

Житомирський державний технологічний університет

Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова

праця на правах рукопису

ЧЕРЕПАНСЬКА ІРИНА ЮРІЇВНА

УДК 621.317.08

ДИСЕРТАЦІЯ
ПРЕЦИЗІЙНА ПРИЛАДОВА СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ
КУТІВ

05.11.01 – Прилади та методи вимірювання механічних величин

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ І. Ю. Черепанська

Науковий консультант Безвесільна Олена Миколаївна,

доктор технічних наук, професор, Заслужений діяч науки та техніки України

Київ – 2019

АНОТАЦІЯ

Черепанська І. Ю. Прецизійна приладова система вимірювання кутів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.01 “Прилади та методи вимірювання механічних величин”. – Житомирський державний технологічний університет, Житомир. Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”. – 2019.

У дисертаційній роботі отримано такі **нові наукові результати**.

1. Вперше з єдиних системних позицій сформульовані загальні принципи побудови прецизійної приладової системи вимірювання кутів (ППСВК) як багаторівневої сукупності різних за призначенням та функціонуванням технічних засобів з неоднорідними властивостями, що полягають у формуванні функціональних відношень між параметрами її рівнів та всередині них з врахуванням прийнятого системного підходу. Це дало можливість здійснити синергетичну інтеграцію та реалізацію пропонованих методів (обробки вимірювальної інформації) та засобів (штучних нейронних мереж (ШНМ), КМОП-матриці);

2. Вперше за принципами синергетичної інтеграції та емерджентності, шляхом застосування фоточутливої матриці на компліментарних структурах метал-окисел-напівпровідник (КМОП-матриці) та ШНМ побудовано ППСВК із розширеними функціональними можливостями (безконтактного вимірювання кутів та експрес-аналізу інтенсивностей спектрального розподілу для визначення хімічного складу металовмісних матеріалів);

3. Вдосконалено математичну модель похибки ППСВК у частині врахування похибки фоточутливої КМОП-матриці шляхом введення флуктуаційних напруг, які виникають на пікселях матриці через дробовий ефект та при тепловому русі зарядів відповідно, що у результаті дає можливість підвищити точність вимірювання ППСВК;

4. Вперше запропоновано новий підхід до автоматичного розпізнавання систематичних та випадкових складових похибок вимірювання кутів, який

базується на використанні ШНМ на етапі аналізу та обробки вимірювальної інформації, експрес-аналізу складових похибок вимірювання за принципом декомпозиції, що дозволило підвищити точність та швидкодію обробки вимірюваної інформації у 1,3 рази;

5. Вперше запропоновано використання ШНМ для експрес-аналізу інтенсивностей спектрального розподілу хімічних речовин, що дало принципову можливість проводити автоматичне визначення їх вмісту у складі металовмісних матеріалів у режимі реального часу зі швидкодією 2,5 с;

6. Вперше проведено визначення складових похибок вимірювання кутів на ЕОМ з використанням ШНМ, що дало принципову можливість автоматизувати процес обробки вимірювальної інформації, а також проводити експрес-аналіз складових похибок вимірювання у режимі реального часу зі швидкодією 2 с.

Порівняння результатів моделювання на ЕОМ процесу визначення складових похибок вимірювання кутів для багатогранних призм, які використовуються для регулювання і настройки кутомірних приладів і безпосереднього вимірювання кутів промислових виробів з використанням двох підходів – застосування ШНМ та дисперсійного аналізу за критерієм Фішера, вказало на переважність ШНМ щодо швидкодії порівняно з традиційно використовуваним критерієм;

7. Вперше запропоновано підхід щодо визначення кількості вимірювань, що дозволяє обґрунтовано визначити необхідну кількість вимірювань кутів ППСВК, яка є достатньою для досягнення заданої точності.

У результаті експериментально доведено, що запропонований метод дозволяє підвищити швидкодію (у 1,3 рази або на 25%) вимірювань кутів порівняно із відомими.

Практичне значення одержаних результатів дисертаційної роботи визначається її спрямованістю на підвищення точності та швидкості вимірювання кутів. Практичними результатами є наступні:

1. Доопрацьована конструкція широкозастосовуваної гоніометричної системи ГС1Л шляхом введення КМОП-матриці та ШНМ, що дозволяє проводити безконтактні вимірювання кутів та здійснювати відповідні інженерні розрахунки при обробці результатів вимірювання з більшою точністю та

швидкодією;

2. Розроблено конструкцію ППСВК на основі ШНМ та фоточутливої КМОП матриці. Це дозволило значно розширити функціональні можливості ППСВК порівняно із відомими в частині експрес-аналізу хімічних елементів у металовмісних матеріалах за методом емісійного спектрального аналізу залежностей спектральних ліній від вмісту хімічних елементів у матеріалах;

3. Розроблено метод визначення систематичних та випадкових складових похибок вимірювання на основі ШНМ, що дає можливість зосередити зусилля користувачів на виборі вірного методу їх обробки, нормування, та компенсації відповідно до вимог, що регламентуються нормативними документами;

4. Новизну пропонованих технічних рішень підтверджено двома патентами України на корисну модель № 57135 та 127373, використання змісту яких, дозволяє розв'язувати задачі вимірювання кутів з підвищеними точністю та швидкодією.

Впровадження результатів роботи. Теоретичні і практичні здобутки роботи впроваджено на підприємствах ПАТ “НВО “Київський завод автоматики”, у навчальний процес в Житомирському державному технологічному університеті при викладанні дисциплін “Основи метрології”, “Технологічні вимірювання та прилади”, “Технології штучного інтелекту”, “Планування, моделювання та верифікація процесів у ГВС”, що підтверджено відповідними актами та довідками.

Наукову новизну та практичне значення результатів роботи підтверджено двома патентами України на корисну модель № 57135 та 127373.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та основні завдання досліджень, показано зв'язок обраного напрямку з науковими програмами, планами, темами, сформульовано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено дані про особистий внесок здобувача, публікації, апробацію та впровадження результатів досліджень.

Показано, що наукова проблема, яка розв'язується в роботі, є актуальною для різних галузей промисловості та господарства України, де на практиці використовуються засоби для вимірювань величин кутів.

У першому розділі розглянуто сутність та зміст задач вимірювання величин

плоских кутів. Показано, що розв'язана у дисертації наукова проблема підвищення точності та швидкодії вимірювання кутів є актуальною для різних галузей промисловості та господарства України, зокрема для таких провідних галузей як приладо- та машинобудування, військова справа, металургія, геодезія, медицина та ін., в яких на практиці використовуються кутовимірювальні засоби. Це обумовлюється тим, що сучасний світовий промисловий ринок та міжнародні стандарти висувають високі вимоги до якості продукції, що виготовляється, яка забезпечується різними технічними засобами і в тому числі приладовими системами вимірювання кутів.

Проведена систематизація відомих підходів щодо вирішення проблеми підвищення точності та швидкодії вимірювання кутів. В результаті теоретичного узагальнення встановлено, що підвищення точності та швидкодії досягається за рахунок розробки нових та вдосконалення існуючих гоніометричних систем.

Проведено аналіз сучасного стану світового ринку приладових систем вимірювання кутів з розробкою відповідних класифікацій, систематизовано їх основні технічні характеристики. Проведений аналіз показав, що сучасні гоніометричні системи найкращих світових зразків (наприклад, виробництва Brookhaven Instruments Corporation США, Trioptics Німеччина та ін.) володіють такими основними перевагами як висока точність, автоматизована обробка інформації, швидкодія і розширені функціональні можливості, але висока вартість робить їх недоступними до використання в межах України. В Україні та інших країнах, зокрема Чехії, Словаччині, Білорусі тривалий час в якості еталонного засобу вимірювання кутів використовувалась кутовимірювальна система ГС1Л, що є розробкою КП СПБ “Арсенал” за активною участю кафедри приладобудування НТУУ “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”. Проте похибки сучасних гоніометричних систем найкращих світових зразків є меншими за похибку ГС1Л, яка становить 0,5", та не перевищують 0,1". Проведено аналіз факторів, що впливають на появу похибок вимірювання кутів. Як результат теоретично узагальнених підходів щодо підвищення точності та швидкодії вимірювання кутів запропоновано на базі відомої ГС1Л побудувати ППСВК підвищеної точності та швидкодії.

В другому розділі обґрунтовано сукупність принципів для побудови

пропонованої ППСВК з підвищеною точністю та швидкістю. Комплексне дотримання запропонованих принципів дозволило отримати якісно нову вимірювальну систему з підвищеною точністю та швидкістю порівняно із відомими.

Виокремлено нові методи та засоби, що ґрунтуються на системному підході, фізичних явищах лазерної спектроскопії, принципах роботи напівпровідникових фоточутливих елементів, нейромережових технологіях синергетична інтеграція яких у побудованій системній моделі запропонованої ППСВК дозволила підвищити точність (на 20% порівняно із відомими) та швидкість (до масштабів реального часу) вимірювання кутів, а також розширити її функціональні можливості, зокрема можливості використання запропонованої ППСВК в якості спектрометра.

Розроблено структурну схему запропонованої ППСВК, яка організована як функціональна сукупність різних технічних засобів з неоднорідними властивостями. Побудовано інформаційну модель функціонування запропонованої ППСВК.

Загальним підходом до побудови ППСВК є системний підхід, при якому ППСВК розглядається як ціле, що складається із частин і елементів, які володіють цілісним характером виконуваних функцій. Аналіз інформаційних джерел, в яких описуються приладові системи вимірювання та їх проектування / побудова / синтез, дозволив сформулювати принципи побудови ППСВК виходячи перш за все із позицій системності.

В третьому розділі розроблено математичну модель похибки запропонованої ППСВК за рахунок вдосконалення відомої базової математичної моделі похибки шляхом врахування нестабільності швидкості обертання Землі навколо своєї осі, а також флуктуаційних напруг які виникають при функціонуванні фоточутливої КМОП-матриці і обумовлюються наявністю теплового та дробового ефектів, що виникають в структурних елементах матриці.

Пропонована математична модель похибки ППСВК системно враховує особливості її складових для подальшого використання при корекції результатів вимірювання.

З метою обґрунтованого визначення необхідної кількості спостережень при багаторазових вимірюваннях, що корелює із заданою точністю і очевидним

чином визначає швидкодію вимірювань, та використовується при нормуванні випадкових складових похибок вимірювання кутів, в даному розділі розроблено підхід щодо визначення необхідної кількості спостережень при багаторазових вимірюваннях, а також методику розрахунку необхідної кількості вимірювань, що є достатньою для досягнення заданої точності при нормуванні випадкових складових похибок вимірювання ППСВК. Пропонована методика є основою розробленого підходу щодо визначення кількості вимірювань.

Застосування пропонованого підходу та методики щодо визначення необхідної та достатньої кількості вимірювань кутів пропованою ППСВК, дозволило отримати вибірку, розмір якої є достатнім для забезпечення високої точності (при заданій точності статистичної вибірки 0,01") отримуваних результатів вимірювання. При цьому час проведення експерименту суттєво скоротився (на 25%) порівняно із відомими результатами наукових досліджень.

Запропонована методика дозволила обґрунтувати кількість спостережень при багаторазових вимірюваннях, зменшити їх кількість приблизно у 1,4 рази порівняно із відомими науковими результатами (тобто із 50 до 37 вимірювань), в результаті чого підвищено швидкодію у 1,3 рази або на 25% порівняно із відомими дослідженнями при вимірюванні кутів з позитивним декрементом точності.

У **четвертому розділі** розроблено ШНМ для функціонування пропонованої ППСВК з огляду на необхідність автоматичного аналізу інформації та її обробки для підвищення точності та швидкодії вимірювання кутів. Зокрема розроблено ШНМ для автоматичного розпізнавання систематичних та випадкових складових похибок вимірювання кутів, що використовується на етапі аналізу та обробки вимірювальної інформації та виконує експрес-аналіз складових похибок вимірювання за принципом декомпозиції, а також ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних речовин, що використовується у пропонованій ППСВК для експрес-аналізу інтенсивностей спектрального розподілу хімічних речовин при визначення їх вмісту у складі металовмісних матеріалів.

Проведено комп'ютерне моделювання роботи розроблених ШНМ. Отримані результати вказують на їх високопродуктивну та правильну (величина оцінюючого функціоналу E – похибки роботи ШНМ відповідає прийнятому значенню $E \leq 0,05$) роботу. При цьому час витрачений ШНМ на обробку

вимірювальної інформації становить 2 с та 2,5 с відповідно, що відповідає режиму реального часу та є значно меншим порівняно із часом, що витрачався при застосуванні інших методів для визначення складових похибок вимірювання, зокрема при застосуванні дисперсійного аналізу за критерієм Фішера.

Застосування розроблених ШНМ підвищує швидкодію пропонованої ППСВК в цілому, а також сприяє підвищенню точності в частині виключення суб'єктивної похибки за рахунок повної автоматизації процесу обробки вимірювальної інформації. Таким чином швидкодію вимірювання кутів пропонованою ППСВК збільшено у 1,3 рази порівняно із результатами відомих наукових досліджень.

В **п'ятому розділі** розвинуто метод ковзного середнього щодо підвищення якості амплітуди вихідних сигналів, зокрема для згладжування амплітуди випадкових складових похибок у вимірювальному сигналі та підвищення точності вимірювання кутів ППСВК в цілому. В роботі програмно реалізовано фільтр Калмана, зокрема його окремий випадок – метод ковзного середнього. Для реалізації автоматизованого функціонування пропонованої ППСВК розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення (ПЗ), застосування якого дозволило пришвидшити процес вимірювання і обробки інформації, а також забезпечити підвищення швидкодії та точності кінцевих результатів вимірювання. ПЗ реалізовано за модульним принципом та за допомогою графічного інтерфейсу користувача дозволяє працювати у двох режимах: режимі вимірювання кутів та режимі спектрального аналізу.

В **шостому розділі** проведено додаткові теоретичні та експериментальні дослідження та комп'ютерне моделювання параметрів кільцевого лазера (КЛ) КЛ 3.970.029 (виробництва казенного підприємства спеціального приладобудування (КП СПБ) “Арсенал”, Україна), що використовується у пропонованій ППСВК в якості прецизійного датчика кута. Отримані результати теоретичних та експериментальних досліджень показали добру збіжність. Дослідження проводились без врахування та з врахуванням зміни швидкості обертання Землі навколо своєї осі.

Отримані результати підтверджують можливість практичного використання КЛ 3.970.029 у складі пропонованої ППСВК в якості

прецизійного датчика кута. Так у використаного в якості прецизійного перетворювача кута КЛ у складі пропонованої ППСВК наявна система стабілізації периметра та система стабілізації потужності випромінювання, які дозволяють підтримувати точнісні параметри КЛ в допустимих межах і забезпечувати високу точність вимірювання до 0,1".

В загальних висновках підбито підсумки основних результатів досліджень, проведених у дисертаційній роботі, як теоретичних, так і експериментальних, отриманих при комп'ютерному моделюванні.

В додатках приведені акти впровадження результатів дисертаційної роботи, копії патентів, список опублікованих праць за темою дисертації.

Ключові слова: штучна нейронна мережа, фоточутлива КМОП-матриця, флуктуаційна напруга, дробовий ефект, тепловий шум, дисперсійний критерій Фішера, інтенсивність спектрального розподілу, кутові вимірювання.

Список публікацій здобувача:

Монографії:

1. Сазонов А. Ю. Наукові основи автоматизованого керування точністю позиціонування промислових роботів при синтезі спеціалізованих гнучких інтегрованих систем. Монографія / А. Ю. Сазонов, В. А. Кирилович, І. Ю. Черепанська, О. М. Безвесільна. – Житомир : ЖДТУ, 2015. – 271 с.

2. Черепанська І. Ю. Теорія і принципи побудови автоматизованої системи для лінійних і кутових переміщень об'єктів виробництва з використанням математичного апарату кватерніонів і елементів штучного інтелекту. Монографія / І. Ю. Черепанська, В. А. Кирилович, О. М. Безвесільна, А. Ю. Сазонов. – Житомир: ЖДТУ, 2016. – 326 с.

3. Черепанська І. Ю. Штучні нейронні мережі при вирішенні задач у технологічних вимірюваннях, приладобудуванні та проектуванні гнучких виробничих систем. Монографія / І. Ю. Черепанська, О. М. Безвесільна, А. Ю. Сазонов, Т. В. Хильченко. – Житомир: ЖДТУ, 2017. – 217 с.

4. Черепанська І. Ю. Штучні нейронні мережі для вирішення задач технологічної підготовки гнучкого виробництва. Монографія / І. Ю. Черепанська, О. М. Безвесільна, А. Ю. Сазонов. – Київ: ДП "НВЦ "Пріоритети", 2018. – 192 с.

Статті у фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

5. Cherepanska I., Automated technological complex to precise angles measurement based on goniometer / I. Cherepanska, E. Bezvesilna, A. Sazonov, A. Lavrishev // *Technological Complexes*. – 2015. – № 1/2 (12). – P. 38 – 45. Індексція *Index Copernicus*, *РИНЦ*, *Ulrich's Periodicals Directory* та ін.

6. Черепанська І. Ю. До питання підвищення точності кутових вимірювань гоніометричними системами / І. Ю. Черепанська, О. М. Безвесільна, А. Ю. Сазонов // *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*. – Житомир: ЖДТУ. – 2016. – № 1 (76). – С. 92 – 99. Індексція *WorldCat*, *BASE*, *eLibrary*, *Google Scholar*.

7. Безвесільна О. М. Експериментальні дослідження інтелектуального високоточного термоанемометричного витратоміру біопалива / О. М. Безвесільна, І. Ю. Черепанська, А. Ю. Сазонов, С. О. Нечай // *Технологический аудит и резервы производства*. – 2016. – № 4/1(30). – С. 22 – 26. Індексція *Index Copernicus*, *Ulrich's Periodicals Director*, *DRIVER*, *BASE*, , *РИНЦ*, *DOAJ*, *WorldCat*, *EBSCO*, та ін.

8. Irina Cherepanska. The procedure for determining the number of measurements in the normalization of random error of an information-measuring system with elements of artificial intelligence / Irina Cherepanska, Elena Bezvesilna, Artem Sazonov, Sergey Nechai, Tatiana Khylichenko // *Eastern-European journal of enterprise technologies*. – 2017. – № 5/9 (89). – P. 58 – 67. Індексція *Scopus*.

9. Irina Cherepanska. Development of artificial neural network for determining the components of errors when measuring angles using a goniometric software-hardware complex / Irina Cherepanska, Elena Bezvesilna, Artem Sazonov, Sergey Nechai, Oleksandr Pidtychenko // *Eastern-European journal of enterprise technologies*. – 2018. – № 9 (95). – P. 43 – 51. Індексція *Scopus*.

10. Irina Cherepanska. Intelligent precise goniometric system of analysis of spectral distribution intensities for definition of chemical composition of metal-containing substances / I. Cherepanska, O. Bezvesilna, Yu. Koval, A. Sazonov // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2019. – Vol. 41. – № 2(41). – P. 263 – 278. Індексція *Scopus*.

11. Черепанська І. Ю. Штучна нейронна мережа для автоматизованого розпізнавання складових похибок вимірювання / І. Ю. Черепанська, О. М. Безвесільна, А. Ю. Сазонов // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – Хмельницький: ХНУ. – 2019. – №1 (269). С. 137 – 145 Індексція *Index Copernicus, Google Scholar, PИHЦ, Polish Scholarly Bibliography*

12. Черепанська І. Ю. Прецизійна інтелектуальна гоніометрична система / І. Ю. Черепанська, О. М. Безвесільна, А. Ю. Сазонов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. Серія Автоматика та інформаційно–вимірювальна техніка. – Вінницький НТУ. – 2019. – № 2(143). – С. 7 – 14. Індексція *Index Copernicus International, Google Scholar*.

Статті у фахових виданнях:

13. Черепанська І. Ю. Методична основа системи підтримки прийняття рішень при автоматизованому виборі пристроїв орієнтування / І. Ю. Черепанська, В. А. Кирилович // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Житомир: ЖДТУ. – 2008. – № 4 (47). – С. 147 – 154.

14. Черепанська І. Ю. Система підтримки прийняття рішень як основа автоматизованого вибору пристроїв орієнтування / І. Ю. Черепанська, В. А. Кирилович // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Житомир: ЖДТУ. – 2008. – № 3 (46). – С. 136 – 141.

15. Черепанська І. Ю. Використання штучних нейронних мереж для задач класифікації пристроїв орієнтування при проектуванні ГІС / І. Ю. Черепанська, В. А. Кирилович // Вестник Севастопольского национального технического университета / Автоматизация процессов и управление. – Севастополь: Изд-во СевНТУ. – 2009. – № 95. – С. 129 – 134.

16. Черепанська І. Ю. Програмне забезпечення для автоматизації процесу керування вибором пристроїв орієнтування гнучких інтегрованих систем / І. Ю. Черепанська, В. А. Кирилович, І. В. Коробійчук // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – Тернопіль: ТДТУ. – 2009. – № 1 (Том 14). – С. 116 – 122.

17. Черепанська І. Ю. Експериментальне дослідження роботи штучних нейронних мереж для задач класифікації пристроїв орієнтування механоскладальних

ГВС / І.Ю. Черепанська, В.А. Кирилович // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. – Житомир: ЖДТУ. – 2009. – № 6. – С. 180 – 191.

18. Черепанська І. Ю. Адаптивність схватів промислових роботів механообробних ГВК / І. Ю. Черепанська, А. Ю. Сазонов, В. А. Кирилович // Методи розв'язування прикладних задач механіки деформівного твердого тіла. – Дніпропетровськ: Наука і освіта. – 2010. – № 11. – С. 119 – 125

19. Кирилович В. А. Адаптивність схватів промислових роботів як напрям підвищення ефективності роботизованих механоскладальних технологій / В. А. Кирилович, І. Ю. Черепанська, А. Ю. Сазонов // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Житомир: ЖДТУ. – 2010. – № 1 (52). – С. 17 – 25.

20. Кирилович В. А. Формування функціональних моделей маніпуляційних систем промислових роботів / В. А. Кирилович, П. П. Мельничук, О. О. Писарчук, І. Ю. Черепанська // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ. – 2011. – № 42. – С. 118 – 124.

21. Черепанська І. Ю. Експериментальне дослідження роботи інтелектуальних моделей прийняття рішень для задач класифікації об'єктів виробництва ГВС / І. Ю. Черепанська, В. А. Кирилович // Технологічні комплекси: науковий журнал. – Луцьк: Видавництво Луцького національного технічного університету. – 2012. – № 1, 2 (5, 6). – С. 255 – 260.

22. Черепанська І. Ю. Використання штучного інтелекту для керування подачею палива інжекторного двигуна / І. Ю. Черепанська, А. В. Гончаренко // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Житомир: ЖДТУ. – 2014. – № 1 (68). – С. 3–11

Патенти України:

23. Патент на корисну модель 124155 (Україна), МПК: G 01 B 21/22 (2006.01). Спосіб вимірювання кутів / І. Ю. Черепанська, О. М. Безвесільна, А. Ю. Сазонов. – Реєстрац. номер заявки u 2017 09792. Заявл. 09.10.2017; Надр. 26.03.2018, Бюл. №6.

24. Патент на корисну модель 127373 (Україна), МПК: G 01 B 21/22 (2006.01). Інтелектуальна система вимірювання кутів / І. Ю. Черепанська, О. М. Безвесільна, А. Ю. Сазонов. – Реєстрац. номер заявки u 2018 02424. Заявл.

12.03.2018; Надр. 25.07.2018, Бюл. №14.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

25. Irina Cherepanska Artificial Neural Network as a Basic Element of the Automated Goniometric System / Irina Cherepanska, Elena Bezvesilna, Artem Sazonov // Recent Advances in Systems, Control and Information Technology. – Warsaw, Poland, 2016. – 827 p. – P. 43–52. (Springer International Publishing AG 2017) <http://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-319-48923-0>

26. Черепанська І. Ю. Щодо формування інтегрованого показника якості роботизованих механоскладальних технологій / І. Ю. Черепанська, В. А. Кирилович, В. В. Ренькас, В. М. Мосійчук // Тези міжвузівської науково-практичної конференції, присвяченої Дню науки (Житомир, 17–18 травня 2012 р.). – Житомир, ЖДТУ, 2012. – 390 с. – С. 82 – 83.

27. Черепанська І. Ю. Комбінований підхід до точнісної атестації робочих зон промислових роботів / І. Ю. Черепанська, А. Ю. Сазонов, В. А. Кирилович, Є. І. Орлюк // Матеріали четвертої Міжнародної науково-практичної конференції “Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2012)” – Херсон: ХДМА, 2012. – Том. 1. – 290 с. – С. 109 – 111.

28. Черепанська І. Ю. Алгоритмічне забезпечення програмної точнісної атестації робочих зон промислових роботів / І. Ю. Черепанська, А. Ю. Сазонов // Матеріали Всеукраїнської науково – практичної конференції "Сучасні технології промислового комплексу". – Випуск 2. – Херсон: ХНТУ (факультет машинобудування), 2015. – 162 с. – С. 113 – 115.

29. Черепанська І. Ю. Автоматизація керування нормуванням часу обробки об'єктів виробництва на свердлувальних верстатах / І. Ю. Черепанська, Д. А. Статкевич // Тези І Всеукраїнської науково-технічної конференції “Комп’ютерні технології: інновації, проблеми, рішення” (17–18 травня 2015 року). – Житомир: ЖДТУ, 2015. – 156 с. – С. 101 – 102.

30. Черепанська І. Ю. Система підтримки прийняття рішень як основа автоматизованого керування якістю на механообробних підприємствах / І. Ю. Черепанська, О. А. Сусік // Сборник статей научно-информационного центра “Знание” по материалам XIII международной заочной научно-практической конференции: “Развитие науки в XXI веке” 1 часть, г. Харьков:

сборник со статьями (уровень стандарта, академический уровень). – Х.: научно–информационный центр “Знание“, 2016. – 160 с. – С. 126 – 134.

31. Черепанська І. Ю. Автоматизоване вимірювання кутів при упорядкуванні виробничого середовища у гнучких виробничих системах / І. Ю. Черепанська, А. С. Калита, О. О. Омельчак // Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС–2016): матеріали II Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю (м. Дніпро, 1–3 листопада 2016 року) / Міністерство освіти і науки України, Державний вищий навчальний заклад “Український державний хіміко-технологічний університет”. – Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2016. – 302 с. – С. 258 – 261.

32. Черепанська І. Ю. Автоматизована система вимірювання геометричних параметрів об'єктів виробництва у машинобудуванні / І. Ю. Черепанська, О. В. Герговський // Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС–2016): матеріали II Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю (м. Дніпро, 1–3 листопада 2016 року) / Міністерство освіти і науки України, Державний вищий навчальний заклад “Український державний хіміко-технологічний університет”. – Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2016. – 302 с. – С. 261 – 263.

33. Черепанська І. Ю. Інтелектуальний високоточний термоанемометричний витратомір біопалива / І. Ю. Черепанська, О. М. Безвесільна, А. Ю. Сазонов, О. О. Добржанський // Метрологія, технічне регулювання, якість: досягнення та перспективи: матеріали Шостої Міжнародної науково–практичної конференції (Одеса, 11–12 жовтня 2016 р.); Одеська державна академія технічного регулювання та якості. – Одеса: Бондаренко М. О., 2016. – 266 с. – С. 164 – 166.

34. Cherepanska I. Decision support system as the basis of automated quality control in mechanical engineering / Irina Cherepanska, Alexander Susik, Artem Sazonov // System Control and Information Technology. – Warsaw. – 20–21.05.2016.

35. Черепанська І. Ю. Дослідження характеристик апаратної та часової складності логічних елементів “виключаюче АБО” та “провідне І” як компонентів обчислювальних засобів систем моніторингу об'єктів управління / А. Ю. Сазонов, І. Ю. Черепанська, Д. О. Осіпов // Автоматизоване управління багатовимірними об'єктами на засадах обчислювального інтелекту: матеріали Всеукраїнської науково–практичної конференції (Івано-Франківськ, 17 – 19 жовтня 2018 року) / Міністерство освіти і науки України, Івано-франківський національний технічний

університет нафти і газу (ІФНТУНГ), Науково-дослідний і проектний інститут ПАТ “Укрнафта”, ТЗОВ “Івано-франківське спеціальне конструкторське бюро засобів автоматизації”, ТЗОВ “Мікрол”. – Івано-Франківськ. –2018. – 250 с. – С. 54 – 56.

36. Черепанська І.Ю. Прецизійна приладова система вимірювання кутів / І.Ю. Черепанська, О.М. Безвесільна, А.Ю. Сазонов // Aktuelle themen im kontext der entwicklung der modernen wissenschaften: Zu den materialien der internationalen wissenschaftlich–praktischen konferenz (Dresden, 23 Januar, 2019). – Dresden: NGO «Europäische Wissenschaftsplattform». – 2019. – V. 5. – 122 p. – P. 79 – 82.

37. Cherepanska Irina Neural network technology for recognizing errors components of the precise instrumental goniometric system / Cherepanska Irina, Bezvesilna Olena, Sazonov Artem // La science et la technologie à l'ère de la société de l'information: coll. de papiers scientifiques «ΛΟΓΟΣ» avec des matériaux de la conf. scientifique et pratique internationale, (Bordeaux, 3 mars, 2019). – Bordeaux : OP «Plateforme scientifique européenne», 2019. – V.9. – 106 p.. – P. 43 – 47

ABSTRACT

Cherepanska I. Yu. Precise instrument system for angles measuring. – Manuscript.

The Thesis for obtaining doctor of technical science scientific degree on the specialty 05.11.01 – instruments and methods of the measuring mechanical values. – Zhytomyr State Technological University, Zhytomyr, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”. – 2019.

In the Thesis the following scientific results have been achieved:

1. For the first time from the unified system positions general principles of the Precise Instrumentation System for Angles Measuring, as a multilevel set of technical equipment with heterogeneous features which is forming of functional relations within and between of parameters of its levels with accepted system approach which was taken into account is formulated. That allows synergy integration and implementation of the proposed methods and tools (ANN, CMOS);

2. For the first time by the principles of synergy integration and emergence Precise Instrumentation System for Angles Measuring has been developed with use of CMOS and Artificial Neural Networks which expands functional capacity (contactless angles measuring and express analysis of the spectral distributions intensities for the chemical composition metal-containing materials);

3. Mathematical models of the Precise Instrumentation System for Angles Measuring in part of taking into account of CMOS errors, by the introduction of fluctuate voltage, which arise on CMOS because of the fractional effect as well as on the thermal motion of charges, respectively, which allows measurement accuracy improvement of PISAM;

4. For the first the new approach for automation recognition of systematic and random components of the angles measuring error, which is based on ANN use at the stage of the analysis and processing of measuring data, rapid analysis of the components of measurement errors on the principle of decomposition, which allowed to improve the accuracy and speed of processing the measured information has been proposed;

5. For the first the use of ANN for rapid analysis of the intensities of spectral distribution of chemicals which allows automated detection their content in the

composition of metal-containing materials in real time with speed of 2,5 s.;

6. For the first time, the determination of the components of the measurement errors of the angles on the computer using ANN, which allows automated processing of the measurement data, as well as to conduct rapid analysis of the components of the measurement errors in real time with a speed of 2 s.;

Comparison of the results of computer simulation of the process of determining the component errors of measuring angles for multifaceted prisms used to adjust and adjust angular meters and direct measurement of angles of industrial products using two approaches - the use of ANN and Fisher's analysis of variance, indicated the preference for ANN compared to the traditionally used criterion.

7. For the first time, an approach is proposed to determine the number of measurements, which allows to reasonably determine the required number of measurements of the angles of PPSVK, which will be sufficient to achieve the given accuracy.

As a result, it is experimentally proved that the proposed method allows to increase the speed (1.3 times or 25 %) of the measurements of angles in comparison with the known ones.

Practical value of the results obtained of Thesis is determined by its focus on improving the accuracy and speed of measuring angles. The practical results are the following:

1. Modified design of the widely used goniometric GS1L system by use of CMOS matrix and ANN, which allows to make contactless measurements of angles and to carry out corresponding engineering calculations with greater accuracy and speed.

2. The design of PISAM which is based on ANN and CMOS has been developed. This made it possible to significantly expand the functionality of PISAM in comparison with the known non-destructive determination of chemical elements in metal-containing materials by the method of emission spectral analysis of the dependences of the spectral lines on the content of chemical elements in materials.

3. The method of determination of systematic and random components of measurement errors on the basis of SNM is developed, which makes it possible to concentrate the efforts of users on the choice of the correct method of their processing, normalization, and compensation in accordance with the requirements regulated by

regulatory documents.

4. The novelty of the proposed technical solutions is confirmed by two utility model patents, the use of which allows to solve the problems of measuring angles with increased accuracy and speed.

Implementation of work results. Theoretical and practical achievements of the work were introduced at the enterprises of PJSC “SMU“ Kyiv Automation Plant”, into the educational process at Zhytomyr State Technological University in teaching the disciplines “Fundamentals of Metrology”, “Technological Measurements and Devices”, “Artificial Intelligence Modeling”, “Planning and verification of processes in the FMS” which is confirmed by relevant acts and certificates.

Scientific novelty and practical value of the results is confirmed by the patents of Ukraine for an inventions № 57135 and 127373.

In the **Introduction** the relevance of the topic is substantiated, the purpose and main tasks of the research are formulated, the connection of the chosen direction with the scientific programs, plans, topics is formulated, the scientific novelty and practical significance of the obtained results are formulated, data on the personal contribution of the applicant, publications, approbation and implementation of the research results are given.

In the **First Section** discussed the essence and content of the problems of measuring the angles of flat objects of production facilities in flexible automated industries, such as instrumentation and mechanical engineering, preliminary exhibition of navigation sensing elements, the analysis of known methods and means of measuring angles with the development of appropriate classifications, systematization of the main technical characteristics of angle measuring sensors, as well as qualitative analysis of factors that influence the appearance of errors in measuring the angles of the previous setup of navigation sensitive elements. It is shown that the scientific problem, which is solved in the thesis, is relevant for various branches of industry and economy of Ukraine, in particular for such leading branches as instrument, machine and automobile industry, military affairs, metallurgy, geodesy, medicine, etc., in which in practice use angular means.

The **second section** formulates the principles of construction of the PISAM and builds its system model. Comprehensive adherence to the formulated principles for the construction of PISAM, as well as the introduction of CMOS-matrix and ANN allowed

to improve the characteristics of PISAM, in particular to improve the accuracy and speed of measurement, as well as to expand the functionality, in terms of the analysis of the intensities of the spectral distribution of materials.

In the **third section**, the mathematical model of the error of PPSVK in terms of taking into account the error of the photosensitive CMOS matrix is improved, by introducing fluctuation stresses that occur on the pixels of the matrix due to the fractional effect and the thermal motion of the charges, which gives the opportunity to improve the measurement accuracy.

An approach was developed to determine the number of measurements, which allows to reasonably determine the required number of measurements of the angles of PISAM, which will be sufficient to achieve the given accuracy.

A methodology for calculating the required number of measurements is developed, which will be sufficient for normalizing the random components of the measurement errors of the PISAM and is the basis of the proposed approach for determining the number of measurements.

Experimental modeling on a computer confirmed the effectiveness of the proposed approach to determining the number of measurements by the method of calculating the required and sufficient number of measurements. It is shown that the size of the sample obtained is sufficient to ensure the high accuracy of the results obtained. The time of the experiment is significantly reduced (by 25 %) compared to the known work.

In the **fourth section**, the ANN architectures are developed as intellectual constituents of the PPSVK. Namely: ANN for automatic recognition of systematic and random components of measurement errors of angles at the stage of analysis and processing of measurement information, rapid analysis of components of measurement errors on the principle of decomposition; ANN of automatic recognition of chemicals used for express analysis of intensities of spectral distribution of chemicals in determining their content in the composition of metal-containing materials.

The ANN structures were optimized in order to ensure their performance and minimize the error of operation.

In the **fifth section**, experimental studies of the performance of the developed ANN are conducted. Namely ANN for automatic recognition of systematic and random components of errors of angle measurement and ANN for automatic recognition of chemicals.

Filtration of the output signal by the moving average method is performed, which is a separate case of the Kalman filter, resulting in improved quality of the output signal. In addition, the algorithm of operation of the proposed PPSVK, as well as software that allows to use the proposed system in an automatic mode for measuring angles with increased accuracy and speed, is developed.

In the **sixth section**, additional theoretical and experimental investigations and computer simulations of the CL parameters used in the proposed PSAP are conducted. The results of theoretical and experimental studies showed good convergence. The studies were conducted without and taking into account the change of the Earth's rotation speed around its axis. The results obtained confirm the influence of the Earth's rotation speed on the CL parameters. To eliminate the error that causes the instability of the Earth's rotation speed around its axis, it is necessary to comply with the requirements of establishing the axis of rotation of the CL relative to the axis of rotation of the Earth. It is shown that further improvement of the accuracy of measuring angles is possible by the use of new methods and information processing tools (ANN and CMOS).

The general conclusions summarize the main results of the research conducted in the dissertation, both theoretical and experimental, obtained in the computer simulation.

Keywords: artificial neural network, CMOS, fluctuation voltage, fractional effect, thermal noise, Fisher's dispersion criterion, intensity of spectral distribution, angular measurements.

List of publisher publications:

Monographs:

1. Sazonov A. Yu. Scientific fundamentals of automated control of precision positioning of industrial robots in the synthesis of specialized flexible integrated systems. Monograph / A. Yu. Sazonov, V. A. Kirillovich, I. Yu. Cherepanskaya, O. M. Bezvesilnaya. – Zhytomyr: ZhDTU, 2015. – 271 p.

2. Cherepanskaya I. Yu. Theory and principles of the construction of an automated system for linear and angular displacements of objects of production using the mathematical apparatus of quaternions and elements of artificial intelligence. Monograph / I. Yu. Cherepanskaya, V. A. Kirillovich, A. M. Bezvsynaya, A. Yu. Sazonov. – Zhytomyr: ZhDTU, 2016. – 326 p.

3. Cherepansk I. Yu. Artificial neural networks in solving problems in

technological measurements, instrumentation and designing of flexible production systems. Monograph / I. Yu. Cherepanskaya, O. M. Bezvyslyna, A. Yu. Sazonov, T. V. Khilchenko. – Zhytomyr: ZhDTU, 2017. – 217 p.

4. Cherepansk I. Yu. Artificial neural networks for solving problems of technological preparation of flexible production: a monograph. Monograph / I. Yu. Cherepanskaya, O. M. Bezvestslyna, A. Yu. Sazonov. – Kyiv: SE “NCC” Priority”, 2018. – 192 p.

Articles in Ukrainian special editions, which are included in international scientific and mathematical bases:

5. Cherepanskaya I. U. Automated technological complex of precision measuring of angles based on goniometer / I. Yu. Cherepanskaya, O. M. Bezvesilna, A. Yu. Sazonov, A. S. Lavrishchev // Technological Complexes. – 2015, No. 1/2 (12). P. 38 – 45. *Index Copernicus, RINC, Ulrich's Periodicals Directory, etc.*

6. Cherepanskaya I. Yu. On the question of increasing the accuracy of angular measurements by goniometric systems / I. Yu. Cherepanskaya, O. M. Bezvyslyna, A. Yu. Sazonov // Bulletin of the Zhytomyr State Technological University. Series: Technical Sciences. – Zhytomyr: ZhDTU. – 2016 – No. 1 (76). P. 92 – 99. *Indexing WorldCat, BASE, eLibrary, Google Scholar*

7. Bezvesslyna O. M. Experimental research of intelligent high – precision thermoanometric biofuel flowmeter / O. M. Bezvsilna, I. Yu. Cherepanskaya, A. Yu. Sazonov, S. O. Nechai // Technological audit and production reserves. – 2016. – No. 4/1 (30). P. 22 – 26. *Index Copernicus index, Ulrich's Periodicals Director, DRIVER, BASE, RINC, DOAJ, WorldCat, EBSCO, etc.*

8. Irina Cherepanska The procedure for determining the number of measurements in the normalization of the random error of an information – measuring system with elements of artificial intelligence / Irina Cherepanska, Elena Bezvesilna, Artem Sazonov, Sergey Nechai, Tatiana Khylichenko // Eastern European Journal of enterprise technologies. – 2017 – No. 5/9 (89). – P. 58 – 67. *Indexing Scopus.*

9. Irina Cherepanska, “Development of the artificial neural network for determining the components of errors when measuring angles using a goniometric software – hardware complex” / Irina Cherepanska, Elena Bezvesilna, Artem Sazonov, Sergei Nechi, Oleksandr Pidtychenko // Eastern European Journal of Enterprise

Technologies. – 2018 – No. 9 (95). – P. 43 – 51. *Scopus indexing*.

10. Irina Cherepanska Intelligent Precision Goniometric System of Analysis of Spectral Distribution Intensities for the Determination of Chemical Composition of Metal – containing Substances / I. Cherepanska, O. Bezvesilna, Yu. Koval, A. Sazonov // *Metallophysics and the latest technologies*. – 2019 – vol. 41, No. 2 (41). – P. 263 – 278. *Indexing Scopus*.

11. Cherepanskaya I. U. Artificial Neural Network for Automated Recognition of Components of Measurement Errors / I. U. Cherepanskaya, O. M. Bezvesilna, A. Yu. Sazonov // *Bulletin of the Khmelnytsky National University. Series: Technical Sciences*. – Khmelnytsky: KhNU. – 2019 – No. 1 (269). P. 137 – 145 *Index Copernicus, Google Scholar, RINC, Polish Scholarly Bibliography*

12. Cherepanskaya I. U. Precision Intelligent Goniometric System / I. U.. Cherepanskaya, O. M. Bezvesilna, A. U. Sazonov // *Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute. Series Automation and information measuring equipment*. – Vinnytsia NTU. – 2019 – No. 2 (143). – P. 7 – 14. *Index Copernicus International, Google Scholar*

Articles in professional editions:

13. Cherepanskaya I. Yu. Methodical basis of decision – support system in the automated selection of orientation devices / I. Yu. Cherepanskaya, V. A. Kirillovich // *Bulletin of the Zhytomyr State Technological University. Series: Technical Sciences*. – Zhytomyr: ZhDTU. – 2008. – No. 4 (47). – P. 147 – 154.

14. Cherepanskaya I. Yu. Decision Support System as the Basis for Automated Choice of Orientation Devices / I. Yu. Cherepanskaya, V. A. Kirillovich // *Bulletin of the Zhytomyr State Technological University. Series: Technical Sciences*. – Zhytomyr: ZhDTU. – 2008. – No. 3 (46). – P. 136 – 141.

15. Cherepanskaya I. Yu. Use of artificial neural networks for the tasks of classification of orientation devices in the design of GIS / I. Yu. Cherepanskaya, V. A. Kirillovich // *Vestnik Sevastopol National Technical University / Automation of processes and management*. – Sevastopol: SevNTU Publishing House. – 2009. – No. 95. – P. 129 – 134.

16. Cherepanskaya I. Yu. Software for automation of the process of control of the selection of devices for orientation of flexible integrated systems / I. Yu.

Cherepanskaya, V. A. Kirillovich, I. V. Korobiychuk // Bulletin of the Ternopil State Technical University. – Ternopil: TSTU. – 2009. – No. 1 (Volume 14). – P. 116 – 122

17. Cherepanskaya I. Yu. Experimental study of the work of artificial neural networks for the tasks of classification of orientation devices of mechano – assembly GVS / I. Yu. Cherepanskaya, V. A. Kirillovich // Processes of mechanical processing in mechanical engineering. – Zhytomyr: ZhDTU. – 2009. – No. 6. – P. 180 – 191

18. Cherepanskaya I. Yu. Adaptability of grips of industrial robots of machining GVK / I. Yu. Cherepanskaya, A. Yu. Sazonov, V. A. Kirillovich // Methods of solving applied problems of mechanics of a deformable solid. – Dnipropetrovsk: Science and Education. – 2010. – No. 11. – P. 119 – 125

19. Kirilovich V. A. Adaptability of grips of industrial robots as a direction of increasing the efficiency of robotic assembly machines / V. A. Kirillovich, I. Yu. Cherepanskaya, A. Yu. Sazonov // Bulletin of Zhytomyr State Technological University. Series: Technical Sciences. – Zhytomyr: ZhDTU. – 2010. – No. 1 (52). – P. 17 – 25

20. Kirilovich V. A. Formation of functional models of manipulation systems of industrial robots / V. A. Kirilovich, P. P. Melnichuk, O. O. Pisarchuk, I. Yu. Cherepanskaya // Progressive Technologies and Systems of Mechanical Engineering: International Sb. scientific works. – Donetsk: DonNTU. – 2011. – No. 42. – P. 118 – 124

21. Cherepanskaya I. Yu. Experimental research of the work of intellectual decision – making models for the tasks of classification of production facilities of GVS / I. Yu. Cherepanskaya, V. A. Kirillovich // Technological complexes: scientific journal. – Lutsk: Publishing House of Lutsk National Technical University. – 2012. – No 1, 2 (5, 6). – P. 255 – 260

22. Cherepanskaya I. Yu. Use of artificial intelligence to control the fuel injection of the injector engine / I. Yu. Cherepanskaya, A. V. Goncharenko // Bulletin of the Zhytomyr State Technological University. Series: Technical Sciences. – Zhytomyr: ZhDTU. – 2014 – No. 1 (68). – P. 3 – 11

Patents of Ukraine:

23. Patent for Utility Model 124155 (Ukraine), IPC: G 01 B 21/22 (2006.01). Method of measuring angles / I. Y. Cherepanskaya, O. M. Bezvesilna, A. Yu. Sazonov – Registrar. Application No. u 2017 09792. Submitted. 10/09/2017; Nadra Mar. 26, 2011, Bul. No. 6

24. Patent for Utility Model 127373 (Ukraine), IPC: G 01 B 21/22 (2006.01).

Intelligent angle measurement system / I. U. Cherepanskaya, O. M. Bezvesilna, A. Yu. Sazonov – Registrar. Application No. u 2018 02424. Declared. 12.032018; Nadra Jul 25, 2013, Byul. №14.

Published work of approbatory character:

25. Irina Cherepanska, Artificial Neural Network as a Basic Element of the Automated Goniometric System, Irina Cherepanska, Elena Bezvesilna, Artem Sazonov // Recent Advances in Systems, Control and Information Technology. – Warsaw, Poland, 2016. – 827 pp. – P. 43 – 52. Springer International Publishing AG 2017 <http://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-319-48923-0>

26. Cherepanskaya I. Yu. On the formation of an integrated indicator of the quality of robotic assembly techniques / I. Yu. Cherepanskaya, V. A. Kirillovich, V. V. Renkas, V. M. Mosiychuk // Abstracts of the inter – university scientific – practical conference devoted to the Day Science (Zhytomyr, May 17 – 18, 2012) – Zhytomyr, ZhDTU, 2012. – 390 p. – P. 82 – 83.

27. Cherepanskaya I. Yu. Combined Approach to Accurate Certification of Industrial Robots Work Areas / I. Yu. Cherepanskaya, A. Yu. Sazonov, V. A. Kirilovich, Ye. I. Orlyuk // Materials of the Fourth International Scientific and Practical Conference [Modern Information and Innovative Technologies in Transport (MINTT – 2012)]. – Kherson: CDMA, 2012. – Tom. 1. – 290 s. – P. 109 – 111.

28. Cherepanskaya I. Yu. Algorithmic assurance of programmatic precise attestation of work zones of industrial robots / I. Yu. Cherepanskaya, A. Yu. Sazonov // Materials of the All – Ukrainian Scientific and Practical Conference “Modern Technologies of the Industrial Complex”, issue 2. – Kherson: KhNTU (Faculty of Mechanical Engineering), 2015 – 162 pp. – P. 113 – 115.

29. Cherepanskaya I. Yu. Automation of management of the normalization of the processing time of production facilities on drilling machines / I. Yu. Cherepanskaya, D. A. Statkevich // Abstracts and All – Ukrainian scientific and technical conference “Computer technologies: innovations, problems, solution” (May 17 – 18, 2015). – Zhytomyr: ZhDTU, 2015. – 156 p. Pp. 101 – 102.

30. Cherepanskaya I. Yu. Decision support system as the basis of automated quality management at machining enterprises / I. Yu. Cherepanskaya, O. A. Susiik // Collection of articles of scientific and information center “Knowledge” on materials of XIII international

correspondence scientific – practical conferences: “The Development of Science in the 21st Century” Part 1, Kharkiv: collection with articles (level of standard, academic level). – Kh.: Scientific and Information Center “Knowledge”, 2016 – 160 p. – P. 126 – 134.

31. Cherepanskaya I. Yu. Automated measurement of angles at the ordering of the production environment in flexible production systems / I. Yu. Cherepanskaya, A. S. Kalita, O. Omelchak // Computer modeling and optimization of complex systems (KMOSS – 2016): Materials of the All – Ukrainian Scientific and Technical Conference with International Participation (Dnipro, November 1 – 3, 2016) / Ministry of Education and Science of Ukraine, State Higher Educational Institution “Ukrainian State Chemical Technology University”. – Dnipro: Dvzn UDKhTU, 2016. – 302 p. – P.258 – 261.

32. Cherepanskaya I. Yu. Automated system for measuring the geometric parameters of production objects in machine building / I. Yu. Cherepanskaya, O. V. Gergovsky // Computer modeling and optimization of complex systems (KMOSS – 2016): Materials of II All – Ukrainian Scientific – technical conference with international participation (Dnipro, November 1 – 3, 2016) / Ministry of Education and Science of Ukraine, State Higher Educational Institution “Ukrainian State Chemical Technology University”. – Dnipro: Dvzn UDKhTU, 2016. – 302 p. – P. 261 – 263.

33. Cherepanskaya I. Yu. Intelligent high – precision thermoanometric flow meter for biofuels / I. Yu. Cherepanskaya, O. Bezvsilna, A. Yu. Sazonov, O. Dobrzansky // Metrology, technical regulation, quality: achievements and prospects: materials The 6th International Scientific and Practical Conference (Odessa, October 11–12, 2016); Odessa State Academy of Technical Regulation and Quality. – Odessa: Bondarenko M. O., 2016. – 266 p. – P. 164 – 166

34. Cherepanska I. Decision support system as the basis of automated quality control in mechanical engineering / Irina Cherepanska, Alexander Susik, Artem Sazonov // System Control and Information Technology, Warsaw, 20 – 21.05.2016

35. Cherepanskaya I. Yu. Investigation of characteristics of hardware and time complexity of logic elements “Eliminating OR” and “Leading I” as components of computing means of monitoring systems for control objects / A. Yu. Sazonov, I. Yu. Cherepanskaya, D. O. Osipov // Automated management of multidimensional objects based on computational intelligence: materials of the All – Ukrainian scientific and practical conference (Ivano – Frankivsk, October 17 – 19, 2018) / Ministry of

Education and Science of Ukraine, Ivano – Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (IFNTUNG), Research and Design Institute of PJSC “Ukrnafta”, LLC “Ivano – Frankivsk Special Design Bureau of Automation Tools”, Ltd. “MicroL”. – Ivano – Frankivsk – 2018 – 250 p. – P. 54 – 56

36. Cherepanskaya I. U. Precision Instrumentation Angle Measurement System / I. Yu. Cherepanskaya, O. M. Bezvesilna, A. Yu. Sazonov // Aktuelle themen im kontext der entwicklung der modernen wissenschaften: Zu den materialen der internationalen wissenschaftlich – praktischen konferenz (Dresden, Jan 23, 2019). – Dresden: NGO “Europäische Wissenschaftsplattform”. – 2019. – B. 5. – 122 p. P. 79 – 82.

37. Cherepanska Irina Neural network technology for recognizing errors components of a precise instrumental goniometric system / Irina Cherepanska, Bezvyslyna Olena, Sazonov Artem // Science and Technology in the Information Society: Coll. de papiers scientifiques “ΛΟΓΟΣ” in the beginning of the matériaux de la conf. scientifique et pratique internationale (Bordeaux, March 3, 2019). – Bordeaux: OP “Plateforme scientifique européenne”, 2019. – V.9. – p. 106. – P. 43 – 47.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
SUMMARY.....	17
СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	32
ВСТУП	33
1. АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ В ГАЛУЗІ ВИМІРЮВАННЯ ВЕЛИЧИН ПОСКИХ КУТІВ	43
1.1. ВИМІРЮВАННЯ ВЕЛИЧИН ПЛОСКИХ КУТІВ	43
1.1.1. Вимірювання величин плоских кутів об'єктів виробництва гнучких автоматизованих виробництвах приладо- та машино будування	44
1.1.2. Вимірювання величин робочих кутів багатограних призм	50
1.1.3. Задача вимірювання величин плоского кута попередньої виставки навігаційних чутливих елементів	53
1.2. АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПОЯВУ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ ВЕЛИЧИН ПЛОСКОГО КУТА ПОПЕРЕДНЬОЇ ВИСТАВКИ НАВІГАЦІЙНИХ ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ	57
1.2.1. Аналіз впливу методу опису орієнтуючих рухів НЧЕ при їх попередній виставці	57
1.2.2. Аналіз впливу інструментальних похибок засобів кутових вимірювань на точність виставки НЧЕ	63
1.2.3. Аналіз впливу методів проведення вимірювань та обробки отриманих результатів на точність виставки НЧЕ	66
1.2.4. Аналіз впливу оператора на точність виставки НЧЕ	69
1.2.5. Загальні рекомендації щодо зменшення похибки вимірювання величини плоского кута	70
1.3. АНАЛІЗ ТА ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ВІДОМИХ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ВЕЛИЧИН ПЛОСКИХ КУТІВ	71
1.3.1 Загальний аналіз відомих сучасних засобів вимірювання величин плоских кутів	71
1.3.2. Гоніометри як основна складова сучасної прецизійної кутовимірювальної техніки	87
1.3.3. Перетворювачі кута.....	94
1.4. ПОСТАНОВКА НАУКОВОЇ ПРОБЛЕМИ, МЕТА ТА ЗАДАЧІ РОБОТИ	98
Висновки до розділу 1	100
ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ ДО РОЗДІЛУ 1	102
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МОДЕЛІ ПРЕЦИЗІЙНОЇ ПРИЛАДОВОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ	119
2.1. ФОРМУЛЮВАННЯ ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ ПРЕЦИЗІЙНОЇ ПРИЛАДОВОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ	120
2.1.1 Принцип модульності побудови прецизійної приладової системи вимірювання кутів	122
2.1.2 Принцип інваріантності (гнучкості) побудови прецизійної приладової системи вимірювання кутів.....	123

2.1.3 Принцип автоматизованості прецизійної приладової системи вимірювання кутів.....	124
2.1.4 Принцип ієрархічності побудови прецизійної приладової системи вимірювання кутів.....	125
2.1.5. Принцип агрегування (комплексування) прецизійної приладової системи вимірювання кутів.....	126
2.1.6. Принцип структурованості прецизійної приладової системи вимірювання кутів.....	127
2.1.7. Принцип системності прецизійної приладової системи вимірювання кутів.....	127
2.1.8. Принцип цілісності прецизійної приладової системи вимірювання кутів	128
2.1.9. Принцип емерджентності прецизійної приладової системи вимірювання кутів.....	128
2.1.10. Принцип декомпозиції та композиції прецизійної приладової системи вимірювання кутів.....	129
2.1.11. Принцип результативності (завершеності) прецизійної приладової системи вимірювання кутів.....	129
2.1.12. Принцип синергетичної інтеграції прецизійної приладової системи вимірювання кутів.....	130
2.2. ПОБУДОВА СИСТЕМНОЇ МОДЕЛІ ПРЕЦИЗІЙНОЇ ПРИЛАДОВОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ	130
2.2.1. Структурна модель прецизійної приладової системи вимірювання кутів	131
2.2.2. Інформаційна модель прецизійної приладової системи вимірювання кутів	136
2.2.3. Декомпозиція організаційної моделі прецизійної приладової системи вимірювання кутів.....	142
2.2.3.1. Датчик кута прецизійної приладової системи вимірювання кутів	142
2.2.3.2. Фотоприймач КМОП-матриця	159
2.2.3.3. Штучна нейронна мережа.....	163
Висновки до РОЗДЛУ 2.....	167
ЛІТЕРАТУРА ДО РОЗДЛУ 2.....	168
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПОХИБКИ ПРЕЦИЗІЙНОЇ ПРИЛАДОВОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ	177
3.1. АНАЛІЗ ВІДОМОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПОХИБКИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРЕЦИЗІЙНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ.....	177
3.2. АНАЛІЗ ПОХИБКИ ФОТОЧУТЛИВОЇ КМОП-МАТРИЦІ	185
3.3. АНАЛІЗ ВПЛИВУ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ЗЕМЛІ НА ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ	188
3.4. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПОХИБКИ ПРЕЦИЗІЙНОЇ ПРИЛАДОВОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ	191
3.5. ШЛЯХИ ЗМЕНШЕННЯ ПОХИБОК ПРЕЦИЗІЙНОЇ ПРИЛАДОВОЇ СИСТЕМИ	

ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ	193
3.6. РОЗРОБКА ПІДХОДУ ЩОДО ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКОСТІ БАГАТОРАЗОВИХ ВИМІРЮВАНЬ ПРИ НОРМУВАННІ ВИПАДКОВОЇ СКЛАДОВОЇ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ ППСВК.....	196
3.6.1. Опис методики визначення оптимальної кількості вимірювань при нормуванні випадкової складової похибки вимірювання прецизійною приладовою системою вимірювання кутів.....	198
3.6.2. Результуючі етапи методики визначення оптимальної кількості вимірювань.....	208
3.6.3. Аналіз ефективності застосування пропонованого підходу визначення кількості вимірювань за методикою визначення оптимальної кількості вимірювань	213
Висновки до розділу 3.....	224
Перелік літератури до розділу 3	225
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА АРХІТЕКТУР ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ПРЕЦИЗІЙНОЇ ПРИЛАДОВОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ	229
4.1. СУТНІСТЬ ПРОБЛЕМИ ДЕКОМПОЗИЦІЇ (РОЗПІЗНАВАННЯ) СИСТЕМАТИЧНИХ ТА ВИПАДКОВИХ СКЛАДОВИХ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ У РЕЗУЛЬТАТАХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ПРИ БАГАТОРАЗОВИХ ВИМІРЮВАННЯХ.....	229
4.2. МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ СИСТЕМАТИЧНИХ ТА ВИПАДКОВИХ СКЛАДОВИХ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ ЗА ПРИНЦИПОМ ДЕКОМПОЗИЦІЇ.....	231
4.2.1. Аналітично-розрахунковий метод визначення складових похибок вимірювання із застосуванням дисперсійного критерію Фішера	232
4.2.2. Методи автоматичного визначення складових похибок вимірювання за принципом декомпозиції	235
4.3. ЗАГАЛЬНІ ЕТАПИ СИНТЕЗУ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ	237
4.4. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ АРХІТЕКТУРИ ШТУЧНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ	244
4.5. РОЗРОБКА ШТУЧНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ АВТОМАТИЧНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ СКЛАДОВИХ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ ЗА ПРИНЦИПОМ ДЕКОМПОЗИЦІЇ.....	246
4.5.1. Побудова структури штучної нейронної мережі автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання за принципом декомпозиції.....	246
4.5.2. Формування навчальної множини для навчання штучної нейронної мережі автоматичного визначення складових похибок вимірювання	252
4.5.3. Практична реалізація та навчання штучної нейронної мережі автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання.....	270
4.5.4. Оптимізація структури штучної нейронної мережі автоматичного визначення складових похибок вимірювання	280
4.6. РОЗРОБКА ШТУЧНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ АВТОМАТИЧНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ ХІМІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ ВМІСТУ У СКЛАДІ МЕТАЛОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	303
4.6.1. Побудова структури штучної нейронної мережі автоматичного розпізнавання хімічних елементів.....	306

4.6.2. Формування навчальної множини для навчання штучної нейронної мережі автоматичного розпізнавання хімічних елементів	311
4.6.3 Практична реалізація та навчання штучної нейронної мережі автоматичного розпізнавання хімічних елементів	314
4.6.4. Оптимізація структури штучної нейронної мережі автоматичного розпізнавання хімічних елементів	314
Висновки до розділу 4	317
ЛІТЕРАТУРА ДО РОЗДІЛУ 4	317
РОЗДІЛ 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ПРЕЦИЗІЙНОЇ ПРИЛАДОВОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ. ЗГЛАДЖУВАННЯ ТА ФІЛЬТРАЦІЯ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПОЯВУ ТА ВЕЛИЧИНУ ВИПАДКОВОЇ ПОХИБКИ	323
5.1. Методика експериментального дослідження похибок штучних нейронних мереж	323
5.2. Експериментальне дослідження похибок штучної нейронної мережі автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання за принципом їх декомпозиції	328
5.3. Експериментальне дослідження похибок штучної нейронної мережі автоматичного розпізнавання хімічних елементів	330
5.4. Фільтрація вихідних сигналів КМОП-матриці за методом ковзних середніх	332
5.5. Опис алгоритму функціонування запропонованої прецизійної приладової системи вимірювання кутів	338
5.6. Опис програмного забезпечення функціонування запропонованої прецизійної приладової системи вимірювання кутів	341
Висновки до розділу 5	345
ЛІТЕРАТУРА ДО РОЗДІЛУ 5	346
РОЗДІЛ 6. ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КІЛЬЦЕВОГО ЛАЗЕРУ ПРЕЦИЗІЙНОЇ ПРИЛАДОВОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ	349
6.1. Аналіз похибок кільцевого лазера як складової запропонованої прецизійної приладової системи вимірювання кутів	349
6.2. Дослідження дрейфу масштабного коефіцієнта кільцевого лазера	353
6.3. Дослідження дрейфу нуля вихідної характеристики кільцевого лазера	363
6.4. Стабілізація параметрів кільцевого лазера	365
Висновки до розділу 6	368
ЛІТЕРАТУРА ДО РОЗДІЛУ 6	369
ВИСНОВКИ ТА ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ	373
ДОДАТКИ	375
Додаток А Акти впровадження результатів дисертаційної роботи	375
Додаток Б Матеріали патентів на корисну модель	378

Додаток В Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	384
Додаток Г Фрагмент навчальної бази даних для навчання штучної нейронної мережі автоматичного розпізнавання хімічних елементів для експрес аналізу інтенсивностей спектрального розподілу хімічних речовин при визначення їх вмісту у складі металовмісних матеріалів	393
Додаток Д Протоколи експериментальних досліджень гоніометра ГСІЛ	426

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

БД – база даних

ДТО – допоміжне технологічне обладнання

ЗВ – засіб вимірювання

ЗВКП – засіб вимірювання кутових переміщень

ЗВЛП – засіб вимірювання лінійних переміщень

ЗУС – засоби упорядкування середовища

КЛ – кільцевий лазер

КМОП-матриця – фоточутлива матриця на компліментарних структурах
метал-окисел-напівпровідник

КП – кутове переміщення

КП СПБ – казенне підприємство спеціального приладобудування

ЛП – лінійне переміщення

НЧЕ – навігаційний чутливий елемент

ОВ – об'єкт вимірювання

ОВС – підсистема обробки та відображення сигналу

ОТО – основне технологічне обладнання

ПАК-ПВК-ХСМ – програмно-апаратний комплекс прецизійного
вимірювання кутів та визначення хімічного складу металовмісних
матеріалів

ПВК – підсистема прецизійного вимірювання кута

ППБ – призма правильна багатогранна

ППСВК – прецизійна приладова система вимірювання кутів

ПР – промисловий робот

ТО – технологічне обладнання

УПІ – підсистема узгодження і перетворення інформації

ШН – штучний нейрон

ШНМ – штучна нейронна мережа

ВСТУП

Велика кількість сучасних науково-господарських задач передбачає проведення різноманітних вимірювань механічних величин, зокрема величин плоских кутів. Високоточні (прецизійні) кутові вимірювання є необхідними у багатьох галузях науки і техніки, наприклад, таких як:

- *високоточні приладо- та машинобудівельні, робототехніка* для контролю геометричних параметрів об'єктів виробництва, їх просторового положення, точного виставлення інструменту, оснащення та робочих органів вимірювальної апаратури, верстатів, промислових роботів тощо;

- *навігація та орієнтація* для визначення положення об'єкта відносно визначеної системи координат, при проектуванні та створенні апаратури точної навігації та керування рухом, виставлення та просторової орієнтації тощо;

- *будівництво* для контролю окремих елементів та споруд у цілому;

- *астрономія, геодезія*, наприклад, для визначення координат небесних та наземних об'єктів та для технологій, пов'язаних з розробкою і створенням систем геодезії, навігації та орієнтації, різних систем навігації та астроорієнтації (наприклад, космічних і морських), при створенні великогабаритних оптичних систем та інтерферометрів;

- *радіо- та лазерна локація*, в оптичних системах визначення траєкторії об'єктів, у системах астроорієнтації і кута для керування антенами, телескопами чи оптичними блоками астронавігації, наприклад, при наведенні на ціль і для визначення координат при спостереженні за ціллю;

- *металургія*: для визначення хімічного складу металів при сортуванні металобрухту, продукції на складах, для вхідного контролю металургійної сировини, у ливарних цехах для експрес-аналізу у режимі реального часу під час плавки металу, для сертифікаційного аналізу продукції тощо.

При цьому галузі використання кутовимірювальних засобів постійно розширюються. У той же час стрімко покращується якість цих засобів, що обумовлюється високими вимогами сучасного виробництва до якості продукції та виконуваних робіт. Це означає, що засоби вимірювання, зокрема кутовимірювальні прилади, системи та комплекси, повинні бути високоякісними.

Необхідно враховувати, що якість відповідно до міжнародних стандартів серії ISO 9000 та Державного стандарту України ДСТУ ISO 9002-95 – це комплексне поняття, під яким розуміється сукупність властивостей продукції, що визначає ступінь її придатності для використання за призначенням. Основними показниками якості, відповідно до того ж стандарту, є точність та швидкодія.

Вказане спонукає на розробку нових прецизійних приладових систем для підвищення точності та швидкості вимірювання кутів, а отже і якості виконуваних робіт у цілому та обумовлює **актуальність** даних досліджень.

Роботи у галузі кутових (гоніометричних) вимірювань проводяться в таких наукових центрах України як “КПІ ім. Ігоря Сікорського”, КП СПБ “Арсенал”, ПАТ “НВО “Київський завод автоматики”, так і за кордоном – в США (компанією Brookhaven Instruments Corporation) та Європі, зокрема в Німеччині (компаніями Trioptics, DataPhysics Instruments GmbH, Moeller-Wedel), Великобританії (компанією Renishaw), Франції (компанією GBX), Фінляндії (компаніями Kibron Inc., Kruss GmbH, KSV Instruments Ltd) та ін. наступними науковцями Julia F Glatthorn, Wan Fong Hoang, Shuler M., Gebelin H., Andrews D. F., Bickel P. J., Hampel F. R., Huber P. J., Rogers W. H., Tu-Key J., Gauss C. F., Glissman T., Moritz H., Nabauer M., Saastamoinen J., Tengstrom E., Williams D., Simone Stauffacher, Wittke H., Filyaevskih R. I., Gan M. A., Rehan K., Sultana S., Zubair Khan M., Farooq Z., Mateen A., Nicola A Maffiuletti, Hans Gerber, Humayun M., Francesco Capitelli, Provenzano M. R., Francesco Colao, Nicola Senesi, Prasoon Diwakar, Pramod Kulkarni, Eileen Birch M., Achouri M., Baba-Hamed T., Beldjilali S. A., Belasr A., Kazunori Akizuk, Kazuto Yamaguchi, Yoshiyuki Morita, Yukari Ohashi, Silvio Nussbaumer, Michael Leunig та ін.

Вагомі науково-практичні дослідження у цій галузі зроблено такими вченими, як Філатов Ю. В., Павлов П. А., Зайцев І. І., Зозуля Л. Г., Ванюрихін А. І., Кравченко В. І., Левченко Є. Г., Борисюк Л. В., Демчук В. Ю., Балла А. А., Виноградов Е. Ф., Аксененко В. Д., Тучин В. В., Апенко М. І., Афанасьєв В. А., Аникст Д. А., Константинович К. М., Меськин І. В., Мейко Б. С., Домрачев В. Г., Шляндин В. М., Бичков С. І., Лук’янов Д. П., Шестопапов Ю. Н., Мардіа К. С., Бакаляр А. І., Ахметжанов А. А., Батраков А. С., Бутусов М. М., Бурнашев М. Н., Сапегин А. Г., Богуславський М. Г., Шарова Є. Є., Федотова І. І., Гречко Ф. М., Смирнова І. І.,

Стракун Г. Н., Кудрявцев М. Д., Грановський В. А., Казаков А. Я., Сірая Т. Н., Мейко Б. С., Щербань В. І. та ін.

В Україні даними питаннями займаються такі науковці, як Лихоліт М. І., Безвесільна О. М., Зайцев І. І., Осадчий Е. П., Чіковані В. В., Орнадський Д. П., Седаліщев В. Н., Патрушев Е. М., Мухин В. М., Застрогин Ю. Ф., Шарапов В. М., Маляров С. П., Петренко О. В., Бартошинський З. В., Щербань В. І., Яценко Ю. О., Коваленко В. А. та ін.

Більшість відомих на даний час гоніометричних систем характеризується не достатніми точністю і швидкістю, а також складністю, низьким рівнем автоматизації та недосконалістю програмного забезпечення. Тому особливо гостро постає питання необхідності розробки нових та вдосконалення існуючих приладових систем вимірювання кутів.

Важлива і складна наукова проблема, що вирішується у дисертації, полягає у підвищенні точності та швидкодії приладових систем вимірювання кутів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано у рамках дослідницької та науково-методичної роботи кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій імені професора Б.Б. Самотокіна Житомирського державного технологічного університету відповідно до Закону України №3715-VI "Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні", статті 4 "Стратегічні пріоритетні напрями інноваційної діяльності на 2011-2021 роки", зокрема за напрямками "Освоєння нових технологій високотехнологічного розвитку транспортної системи, ракетно-космічної галузі, авіа- і суднобудування, озброєння та військової техніки" та "Розвиток сучасних інформаційних, комунікаційних технологій, робототехніки", а також відповідно до держбюджетної тематики Міністерства освіти і науки України в науково-дослідних роботах № 33 "Наукові основи та фундаментальні дослідження приладової системи для вимірювання механічних величин з цифровими відео зображеннями" (0112U001793, 2014 р.), № 48 "Теорія дослідження температурного поля біопалива нового термоанемометричного витратоміра з використанням алгоритмічних методів, апарату штучних нейронних мереж" (номер державної реєстрації 0114U000545, 2017 р.), № 2019 "Система керування навігаційного комплексу стабілізатора озброєння легких броньованих машин" (номер державної реєстрації 0117U000405, 2017 р.).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення точності та швидкодії гоніометричних вимірювань.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні завдання:

1. Провести аналіз існуючих приладових систем вимірювання кутів та систематизувати відомі підходи щодо підвищення точності та швидкодії для використання отриманих результатів при побудові прецизійної приладової системи вимірювання кутів (ППСВК);

2. Запропонувати сукупність принципів для побудови ППСВК з підвищеною точністю та швидкістю;

3. Оновити математичну модель похибки ППСВК, яка системно враховує особливості її складових для подальшого використання при корекції результатів вимірювання;

4. Розробити підхід до визначення необхідної кількості спостережень при багаторазових вимірюваннях, що корелює із заданою точністю та використовується при нормуванні випадкових складових похибок вимірювання кутів;

5. Розробити штучні нейронні мережі (ШНМ) для функціонування ППСВК з огляду необхідності автоматичного аналізу інформації та її обробки для підвищення точності та швидкодії вимірювання кутів;

6. Розвинути метод ковзного середнього щодо фільтрації вихідного сигналу ППСВК для зменшення флуктуацій та підвищення точності вимірювання;

7. Розробити алгоритмічне та програмне забезпечення, що реалізує автоматизоване функціонування ППСВК, та рекомендації щодо його практичного використання;

8. Впровадити результати роботи у виробництво та у навчальний процес Житомирського державного технологічного університету.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання величини плоских кутів за допомогою прецизійної приладової системи вимірювання кутів.

Предметом дослідження є прецизійна приладова система вимірювання кутів підвищеної точності та швидкодії.

Методи досліджень базуються на застосуванні фізичних явищ лазерної спектроскопії, фізичних принципів роботи напівпровідникових фоточутливих елементів, нейромережових технологій, теорії ймовірності та математичної

статистики, методів системного підходу, теорії множин, дискретної математик та обчислювальної математики, а також комп'ютерного моделювання.

Достовірність наукових результатів, висновків та рекомендацій підтверджено вибором апробованих методів досліджень, програмних засобів, комп'ютерним моделюванням, співпадінням теоретичних, експериментальних результатів та досліджень на комп'ютері.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. Вперше з єдиних системних позицій сформульовані загальні принципи побудови ППСВК як багаторівневої сукупності різних за призначенням та функціонуванням технічних засобів з неоднорідними властивостями, що полягають у формуванні функціональних відношень між параметрами її рівнів та всередині них з врахуванням прийнятого системного підходу. Це дало можливість здійснити синергетичну інтеграцію та реалізацію пропонованих методів (обробки вимірювальної інформації) та засобів (ШНМ, КМОП-матриці);

2. Вперше за принципами синергетичної інтеграції та емерджентності, шляхом застосування фоточутливої матриці на компліментарних структурах метал-окисел-напівпровідник (КМОП-матриці) та ШНМ побудовано ППСВК із розширеними функціональними можливостями (безконтактного вимірювання кутів та експрес-аналізу інтенсивностей спектрального розподілу для визначення хімічного складу металовмісних матеріалів);

3. Вдосконалено математичну модель похибки ППСВК у частині врахування похибки фоточутливої КМОП-матриці шляхом введення флуктуаційних напруг, які виникають на пікселях матриці через дробовий ефект та при тепловому русі зарядів відповідно, що у результаті дає можливість підвищити точність вимірювання ППСВК;

4. Вперше запропоновано новий підхід до автоматичного розпізнавання систематичних та випадкових складових похибок вимірювання кутів, який базується на використанні ШНМ на етапі аналізу та обробки вимірювальної інформації, експрес-аналізу складових похибок вимірювання за принципом декомпозиції, що дозволило підвищити точність та швидкодію обробки вимірюваної інформації у 1,3 рази;

5. Вперше запропоновано використання ШНМ для експрес-аналізу

інтенсивностей спектрального розподілу хімічних речовин, що дало принципову можливість проводити автоматичне визначення їх вмісту у складі металовмісних матеріалів у режимі реального часу зі швидкістю 2,5 с;

6. Вперше проведено визначення складових похибок вимірювання кутів на ЕОМ з використанням ШНМ, що дало принципову можливість автоматизувати процес обробки вимірювальної інформації, а також проводити експрес-аналіз складових похибок вимірювання у режимі реального часу зі швидкістю 2 с.

Порівняння результатів моделювання на ЕОМ процесу визначення складових похибок вимірювання кутів для багатограних призм, які використовуються для регулювання і настройки кутомірних приладів і безпосереднього вимірювання кутів промислових виробів з використанням двох підходів – застосування ШНМ та дисперсійного аналізу за критерієм Фішера, вказало на переважність ШНМ щодо швидкості порівняно з традиційно використовуваним критерієм;

7. Вперше запропоновано підхід щодо визначення кількості вимірювань, що дозволяє обґрунтовано визначити необхідну кількість вимірювань кутів ППСВК, яка є достатньою для досягнення заданої точності.

У результаті експериментально доведено, що запропонований метод дозволяє підвищити швидкість (у 1,3 рази або на 25 %) вимірювань кутів порівняно із відомими.

Практичне значення одержаних результатів дисертаційної роботи визначається її спрямованістю на підвищення точності та швидкості вимірювання кутів. Практичними результатами є наступні:

1. Доопрацьована конструкція широкозастосовуваної гоніометричної системи ГС1Л шляхом введення КМОП-матриці та ШНМ, що дозволяє проводити безконтактні вимірювання кутів та здійснювати відповідні інженерні розрахунки при обробці результатів вимірювання з більшою точністю та швидкістю;

2. Розроблено конструкцію ППСВК на основі ШНМ та фоточутливої КМОП матриці. Це дозволило значно розширити функціональні можливості ППСВК порівняно із відомими в частині експрес-аналізу хімічних елементів у металовмісних матеріалах за методом емісійного спектрального аналізу залежностей спектральних ліній від вмісту хімічних елементів у матеріалах;

3. Розроблено метод визначення систематичних та випадкових складових похибок вимірювання на основі ШНМ, що дає можливість зосередити зусилля користувачів на виборі вірного методу їх обробки, нормування, та компенсації відповідно до вимог, що регламентуються нормативними документами;

4. Новизну пропонованих технічних рішень підтверджено двома патентами України на корисну модель № 57135 та 127373, використання змісту яких, дозволяє розв'язувати задачі вимірювання кутів з підвищеними точністю та швидкістю.

Впровадження результатів роботи. Теоретичні і практичні здобутки роботи впроваджено на підприємствах ПАТ “НВО “Київський завод автоматики”, у навчальний процес в Житомирському державному технологічному університеті при викладанні дисциплін “Основи метрології”, “Технологічні вимірювання та прилади”, “Технології штучного інтелекту”, “Планування, моделювання та верифікація процесів у ГВС”, що підтверджено відповідними актами та довідками.

Наукову новизну та практичне значення результатів роботи підтверджено двома патентами України на корисну модель № 57135 та 127373.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення та результати, винесені на захист, отримані автором самостійно. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, у дисертації використані ті результати, що є результатом особистої праці здобувача. Достовірність і обґрунтованість результатів дисертаційної роботи підтверджено збіжністю аналітичних розрахунків з експериментальними і комп’ютерним моделюванням.

Особистий внесок здобувача у працях, що опубліковані у співавторстві: [1] – розділ 1 підготовлений здобувачем, а розділи 2, 3, 4 – спільно із співавторами; [2] – розділ 2, 3 підготовлений здобувачем, а розділи 1 та 4 – спільно із співавторами; [3] – розділ 2, 4 підготовлений здобувачем, а розділи 1 та 3 – спільно із співавторами; [3] – розділ 3 підготовлений здобувачем, а розділи 1, 2 та 4 – спільно із співавторами; [5] – здобувачем розроблено структурну схему автоматизованого технологічного комплексу високоточного вимірювання кутів на базі гоніометра, що дозволяє реалізувати автоматизовану обробку вимірювальної інформації в режимі реального часу; [6] – здобувачем проаналізовано а також представлено сукупністю відповідних компонентів систематичну похибку розроблюваної автоматизованої високоточної

гоніометричної системи, за результатами попереднього аналізу джерел її виникнення; [7] – здобувачем розроблено нейропроцесор для компенсації динамічних похибок інтелектуального високоточного термоанемометричного витратоміру біопалива; [8] – здобувачем розглянуто особливості процесу оцінки та нормування випадкової складової похибки вимірювання гоніометричної системи з елементами штучного інтелекту; розроблено загальну методiku нормування випадкової складової похибки вимірювання, яка дозволить обґрунтовано визначати необхідну та достатню кількість повторів вимірювань для досягнення заданої точності; [9] – здобувачем розроблено штучну нейронну мережу для визначення складових похибок вимірювання кутів автоматизованими гоніометричними системами; [10] – здобувачем розроблено нову прецизійну інтелектуальну гоніометричну систему на базі лазерного гоніометра, КМОП-матриці та штучної нейронної мережі, а також з використанням методу спектроскопії, нейромережових технологій та фізичних принципів роботи фотоелементів; [11] – здобувачем розроблено штучну нейронну мережу, яка дозволяє розпізнавати складові похибок вимірювання в режимі реального часу при гоніометричних вимірюваннях величин плоского кута багатограних призм та є альтернативою традиційному методу дисперсійного аналізу за критерієм Фішера множини вимірювальних даних, а також дозволяє автоматизувати аналіз вимірювальної інформації при нормуванні похибок вимірювання; [12] – здобувачем розроблено інтелектуальну гоніометричну систему та штучну нейронну мережу; [13] – здобувачем розроблено методiku автоматизованого вибору пристроїв орієнтування, як основу системи підтримки прийняття рішень для автоматизації процесу керування вибором пристроїв орієнтування; [14] – здобувачем розроблено систему підтримки прийняття рішень, що орієнтована на аналіз значних об’ємів різномірної інформації при автоматизації процесу вибору пристроїв орієнтування для гнучких інтегрованих систем; [15] – здобувачем запропоновано підхід до створення автоматизованої класифікації пристроїв орієнтування з використанням штучних нейронних мереж; [16] – здобувачем розроблено програмне забезпечення для автоматизації процесу вибору пристроїв орієнтування гнучких інтегрованих систем; [17] – здобувачем проведено експериментальне дослідження роботи розроблених штучних нейронних мереж

для задач класифікації пристроїв орієнтування; [18] – здобувачем визначено напрямки подолання негативного впливу явища "конфлікт сили" на складові технологічної роботизованої системи при підвищенні точності промислових роботів за умов механообробних ГВК; [19] – здобувачем досліджено залежність вартості промислових роботів від величини похибки позиціонування; [20] – здобувачем підготовлено теоретичне обґрунтування необхідності застосування нового математичного апарату кватерніонів для підвищення точності маніпуляційних систем; [21] – здобувачем розроблено штучні нейронні мережі для задач класифікації об'єктів виробництва ГВС та експериментально досліджено їх роботу; [22] – здобувачем розроблено систему інтелектуального керування подачею палива у інжекторний двигун внутрішнього згорання на основі нечіткої логіки; [23] – здобувачу належить основна ідея винаходу; [24] – здобувачу належить основна ідея винаходу; [25] – здобувачем визначено вхідні та вихідні вектори і структура штучної нейронної мережі; [26] – здобувачем надано інформацію щодо змісту інтегрованого показника якості; [27] – здобувачем розглянуто фактори, що впливають на точність промислових роботів; [28] – здобувачем викладено відомості щодо точності промислових роботів; [29] – здобувачу належить ідея застосування штучних нейронних мереж для автоматизації керування нормуванням часу; [30] – здобувачем розроблено структурну схему системи підтримки прийняття рішень для автоматизації керування якістю на механообробних підприємствах; [31] – здобувачем сформульовані принципи автоматизації вимірювання кутів; [32] – здобувачем проведено аналітичний огляд систем вимірювання геометричних параметрів об'єктів виробництва у машинобудуванні; [33] – здобувачем проведено дослідження точності високоточного термоанемометричного витратоміру біопалива; [34] – здобувачем розроблено структурну схему штучної нейронної мережі; [35] – здобувачем проведено аналітичний огляд апаратної та часової складності логічних елементів; [36] – здобувачем сформульовані принципи побудови прецизійної приладової системи вимірювання кутів; [37] – здобувачем розроблено штучну нейронну мережу та досліджено її роботу.

Апробація результатів дисертації. Викладені у дисертаційній роботі результати досліджень доповідалися, обговорювалися та одержали схвалення на

13 наукових конференціях і семінарах: міжвузівська науково-практична конференція, присвячена Дню науки (Житомир, 17-18 травня 2012 р.); четверта Міжнародна науково-практична конференція “Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT–2012)” (м. Херсон, 2012 р.); Всеукраїнська науково-практична конференція “Сучасні технології промислового комплексу” (м. Херсон, 2015 р.); Всеукраїнська науково-технічна конференція “Комп’ютерні технології: інновації, проблеми, рішення” (м. Житомир, 2015 р.); XIII Міжнародна заочна науково-практична конференція “Развитие науки в XXI веке” (м. Харків, 2016 р.); II Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю “Комп’ютерне моделювання та оптимізація складних систем” (м. Дніпро, 2016 р.); VI Міжнародна науково-практична конференція “Метрологія, технічне регулювання, якість: досягнення та перспективи” (м. Одеса, 2016 р.); System, Control and Information Technology (Warsaw, 2016); Всеукраїнська науково-практична конференція “Автоматизоване управління багатовимірними об’єктами на засадах обчислювального інтелекту” (м. Івано-Франківськ, 2018 р.); XI Міжнародна науково-практична конференція “Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси” (м. Київ, 2018); Міжнародна науково-практична конференція “Aktuelle themen im kontext der entwicklung der modernen wissenschaften” (Dresden, 2019); Міжнародна науково-практична конференція “La science et la technologie à l'ère de la société de l'information” (Bordeaux, France, 2019).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 37 наукових праць, у тому числі 4 монографії, 18 статей у наукових фахових виданнях (з них 8 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 2 патенти на корисну модель, 13 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та загальний обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 6 розділів, загальних висновків та 5 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 432 сторінки. Основний зміст викладено на 370 сторінках, який містить 113 рисунків, 41 таблицю. Список використаних інформаційних джерел по розділах становить: розділ 1 – 166 джерел, розділ 2 – 91 джерело, розділ 3 – 29 джерел, розділ 4 – 48 джерел, розділ 5 – 17 джерел, розділ 6 – 30 джерел.

1. АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ В ГАЛУЗІ ВИМІРЮВАННЯ ВЕЛИЧИН ПОСКИХ КУТІВ

1.1. Вимірювання величин плоских кутів

Сучасний розвиток власного машино- та приладобудівного виробництва, побудованого за принципами гнучкості та організованого як гнучкі-комп'ютерно-інтегровані системи (ГКІС), а також множина інших науково-господарських задач передбачають проведення різноманітних вимірювань в тому числі і механічних величин, зокрема величин плоских кутів.

Точні (прецизійні) кутові вимірювання є необхідними в багатьох галузях, наприклад, таких як:

– *високоточні приладо- та машинобудівні виробництва, робототехніка*: для вимірювання кутів здійснюється, наприклад, для контролю геометричних параметрів об'єктів виробництва (ОВ) та їх просторового положення, для точного виставлення інструменту, оснащення та робочих органів вимірювальної апаратури, верстатів, промислових роботів тощо.

– *навігація та орієнтація*, наприклад, для визначення положення об'єкта відносно деякої наперед визначеної системи координат. В навігації високоточні лінійно-кутові вимірювання проводяться, наприклад, при проектуванні та створенні апаратури точної навігації та керування рухом [1];

– *будівництво*, наприклад, для контролю окремих елементів та споруд в цілому;

– *астрономія та геодезія*, наприклад, для визначення координат небесних та наземних об'єктів. Тут особливо важливими є кутові вимірювання для технологій, пов'язаних з розробкою і створенням систем геодезії, навігації та орієнтації, у тому числі точних гоніометрів, гіроскопів, кодових датчиків кута, авіаційних, космічних і морських систем навігації та астроорієнтації, а також при створенні великогабаритних оптичних систем і поліпезазних інтерферометрів [1]. Так, наприклад, в геодезії кутові вимірювання проводять для визначення горизонтальних і вертикальних кутів при виконанні комплексу робіт з вишукувань, проектування, будівництва та експлуатації автомобільних доріг,

споруд, об'єктів лісового господарства тощо [3];

– *радіо- та лазерна локація*, в оптичних системах визначення траєкторії об'єктів, у системах астроорієнтації і кута для керування антенами, телескопами чи оптичними блоками астронавігації, наприклад, при наведенні на ціль і для визначення координат при спостереженні за ціллю;

– *сталеварна промисловість* для визначення хімічного складу металів при сортуванні металобрухту, продукції на складах, для вхідного контролю металургійної сировини, у ливарних цехах для експрес-аналізу в режимі реального часу під час плавки металу, для сертифікаційного аналізу продукції тощо.

Також до цього кола задач належать такі спеціальні прикладні метрологічні задачі, як градування та калібрування дискретних кругових (кутових) шкал та високоточні вимірювання кутів за допомогою цих шкал, в тому числі у складних випадках вимірювання кутів великої розмірності. При цьому в якості кругової шкали можуть використовуватись найрізноманітніші пристрої, які є як власне засобами вимірювання (ЗВ) або їх складовою частиною (призмами, лімбами, різноманітними радіальними та растровими решітками тощо), так і перетворювачами кута, що безпосередньо використовуються в контурі керування (передусім, датчиками кута різноманітних типів) [1].

1.1.1. Вимірювання величин плоских кутів об'єктів виробництва гнучких автоматизованих виробництва приладо- та машинобудування

Сучасне приладо- та машинобудування організоване як гнучкі комп'ютерно-інтегровані системи (ГКІС) центральною частиною яких є гнучкі виробничі системи (ГВС). Такі виробництва здатні до швидкого переналагодження на випуск нових видів продукції (в межах їх технологічних можливостей) заданої якості, відповідно до швидко змінюваних умов сучасного світового промислового ринку. Це досягається за рахунок наявності якісної та кількісної гнучкості виробничих систем. Якісна гнучкість забезпечується за рахунок наявності універсального обслуговуючого персоналу і гнучкого виробництва із застосуванням ГВС. ГВС являють собою сукупність у різних поєднаннях обладнання з числовим програмним управлінням (ЧПУ), гнучких виробничих модулів та комірок (ГВМ та ГВК), окремих одиниць технологічного

обладнання (ТО), систем технологічних вимірювань та забезпечення функціонування гнучких переналагоджуваних систем в автоматичному режимі протягом заданого інтервалу часу. При цьому, для забезпечення заданих показників якості продукції, що виготовляється проводяться відповідні технологічні вимірювання та застосовуються високоточні вимірювальні системи для вимірювання величин множини геометричних та механічних параметрів об'єктів виробництва (ОВ), в тому числі величин плоских кутів.

Як показує практика в діючих ГВС при виконанні різних технологічних процесів (ТП), зокрема ТП механічної обробки різанням, від 20 до 70% допоміжного часу для дрібних і середніх деталей і від 50 до 70% для великих деталей займають допоміжні технологічні операції, в тому числі операції вимірювання, автоматизація яких дозволяє скоротити цей час [1].

Наприклад, у багатьох виробках машино- та приладобудування застосовують вузли і деталі, якість роботи яких залежить від точності їх кутових розмірів. Такими вузлами і деталями є, наприклад, підшипники з конічними роликами, які служать для одночасного сприйняття радіальних і осьових навантажень величина яких залежить від кута конуса зовнішнього кільця [2] (рис. 1.1), направляючі типу “ластівчин хвіст” (рис. 1.2), кінці шпинделів і інструментів металорізальних верстатів (рис. 1.3), конічні місця посадок точних осей (рис. 1.4), кути оптичних призм і приладів, кути хвостиків лопаток робочих компресорних двигунів тощо.

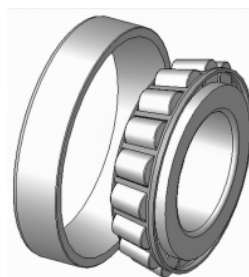


Рис. 1.1. Однорядний конічний роликовий підшипник

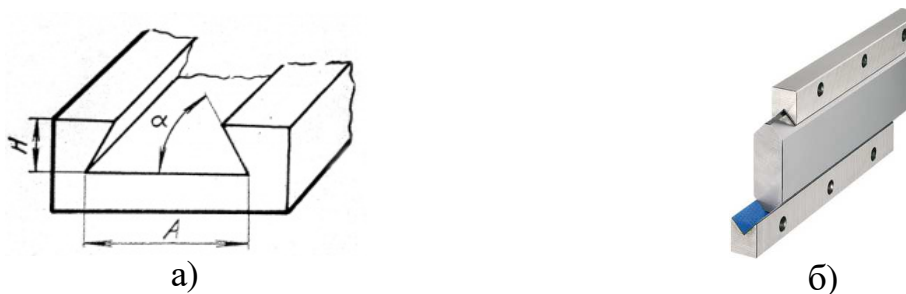


Рис. 1.2. Направляючі типу «ластівчин хвіст»: а) креслення, б) приклад зовнішнього вигляду



Рис. 1.3. Види металорізальних інструментів

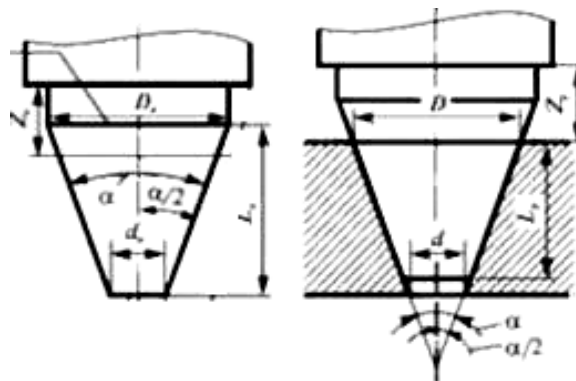


Рис. 1.4. Приклад конічного з'єднання ОВ

При з'єднанні різних деталей в машинобудуванні найбільш поширеними є конічні з'єднання, що забезпечують високу точність центрування, герметичність з'єднання, передачу великих обертаючих моментів при нерухомих посадках з можливістю неодноразового збирання і розбирання з'єднання, необхідні зазори при рухомих посадках за рахунок осьового зсуву деталей з'єднання, щільність посадок конічних деталей і т.д. При цьому, основними елементами, що характеризують деталі конічних з'єднань є номінальний діаметр конуса, діаметри більшої і меншої основи конуса, довжина конуса і кут конуса (рис. 1.4). Замість кута конуса іноді задається кут нахилу твірної до осі (половина кута конуса) і конусність (подвоєний тангенс кута нахилу) [5]. Тому, сучасне виробництво висуває все більш жорсткі вимоги до точнісних характеристик оброблювального обладнання, що піддержується приведеним в літературі [6]. Виконання цих вимог безперечно забезпечує можливості виготовлення деталей з високою точністю відповідно до міжнародних стандартів якості. Саме тому задача забезпечення та проведення високоточних вимірювань в автоматизованому

режимі з можливістю швидкої обробки інформації в цифровому режимі для сучасного виробництва стоїть надзвичайно гостро.

Відомо, що сучасні виробники повністю залежать від вимог ринку споживача. Тому розвиток ГВС є досить багатогранною задачею, успішне вирішення якої вимагає застосування прогресивних сучасних технологій (виробництва, контролю, вимірювання тощо), які базуються на сучасних досягненнях науки та техніки. Організація сучасного виробництва, як ГКІС (рис. 1.5) інтеграція в яких здійснюється за рахунок застосування ЕОМ, баз знань, баз даних та елементів систем штучного інтелекту дозволяє суттєво підвищити якість виробів та забезпечити ефективне функціонування виробництва навіть в умовах різко змінюваних вимог ринку.

Як зазначалось раніше, основною складовою частиною ГКІС є ГВС, побудовані на базі гнучких виробничих модулів (ГВМ) та гнучких виробничих комірок (ГВК), до складу яких входить основне технологічне обладнання (наприклад, верстати з числовим програмним керуванням), допоміжне технологічне обладнання (наприклад, накопичувачі, автоматизовані пристрої завантаження ОВ, видалення відходів виробництва, транспортні системи тощо), промислові роботи, системи забезпечення функціонування (наприклад, системи та пристрої вимірювання та контролю).

В сучасному виробництві частка витрат на вимірювання є досить вагомою, наприклад, для деяких виробництв машинобудування вона може становити 25 – 30 % від загальної собівартості продукції. При чому основну долю вимірювань (приблизно 60 – 90%) складають вимірювання геометричних параметрів ОВ (лінійні та кутові). Саме тому будь яке сучасне виробництво супроводжується інтенсивним розвитком та вдосконаленням засобів вимірювання та контролю.

Метрологічне забезпечення виробничого процесу, технологічні вимірювання та контроль відіграють найважливішу роль в сучасному виробництві у забезпеченні якості та конкурентоспроможності продукції практично усіх галузей промисловості. Наприклад, місце технологічних вимірювань у складі машинобудівної ГВС приведено на рис. 1.6. Особливе місце в цьому займають засоби вимірювання та контролю механічних та геометричних величин, тому, що якість готових ОВ залежить від точності виготовлення,

вимірювання та контролю геометричних параметрів їх відповідальних складових. Особливо це стосується машино- та приладобудування, як провідних галузей виробництва будь яких країн світу.

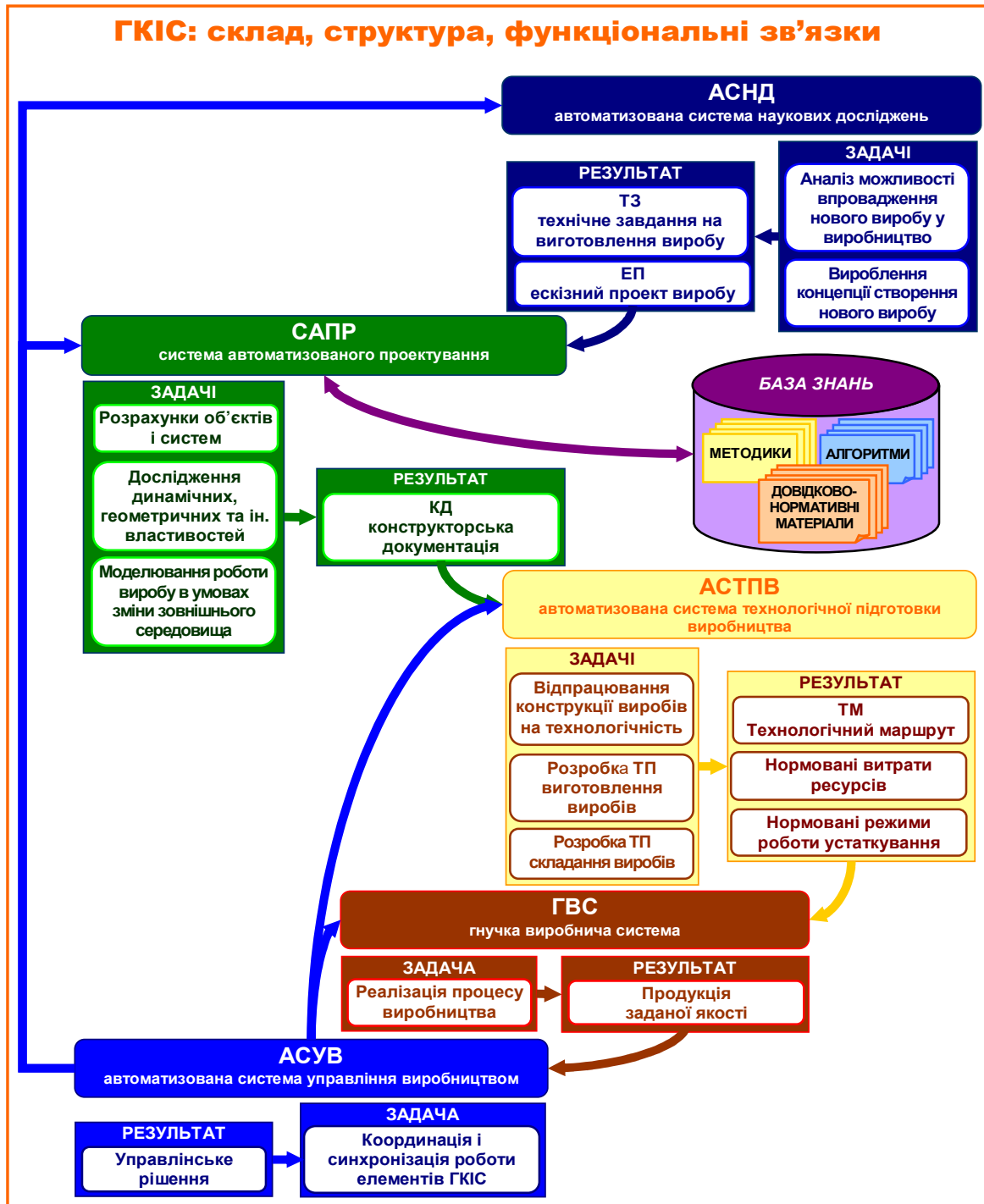


Рис. 1.5. Організаційно-функціональна структура ГКІС

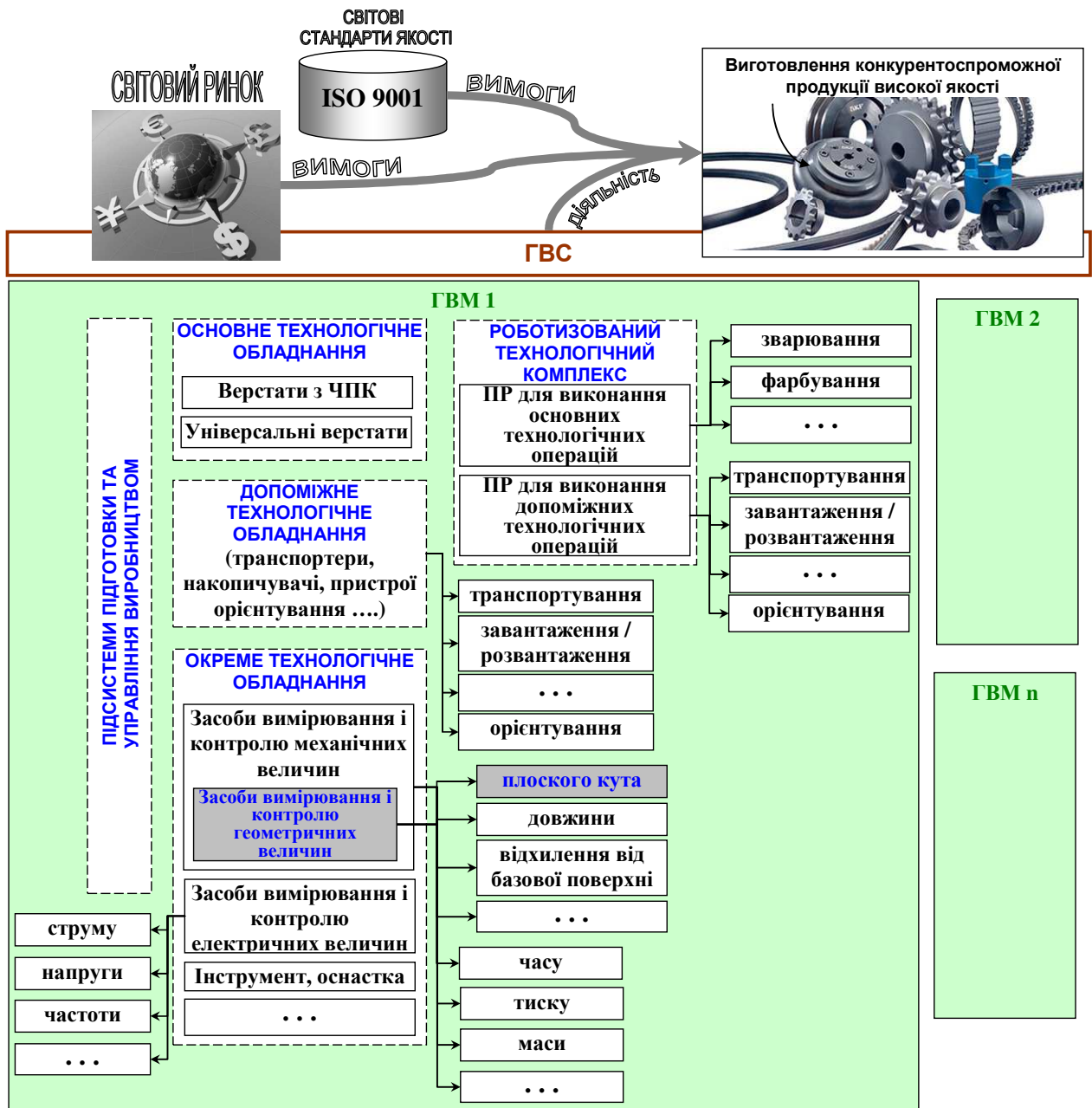


Рис. 1.6. Структура ГВС машинобудування

Технічний контроль, зокрема контроль точності геометричних параметрів об'єктів виробництва є одним із видів контролю якості. Його проводять з використанням відповідних вимірювальних пристроїв високої точності. За вимірювальними даними геометричних параметрів об'єктів виробництва встановлюють причини, що призводять до відхилень від заданих показників якості та застосовують відповідні заходи, наприклад, проводять налагодження та / або ремонт обладнання, його модернізацію, заточку або заміну інструменту тощо.

Задача вимірювання величини плоского кута в машино- та приладобудуванні полягає у знаходженні значення вимірювального кута дослідним шляхом з

використанням спеціальних засобів вимірювання та визначення величини похибки яка була допущена при цьому.

1.1.2. Вимірювання величин робочих кутів багатогранних призм

Призми правильні багатогранні (ППБ), надалі – призми, призначені для використання в якості:

- робочих засобів для регулювання і настройки кутомірних приладів і безпосереднього вимірювання кутів ОВ;
- еталонних мір для передачі розміру одиниці плоского кута робочим засобам вимірювання кутів.

Призми являють собою багатозначні кутові засоби – міри, в основі яких лежить правильний багатогранник, який має форму прямої призми з різним числом бічних граней, які є вимірювальними поверхнями та попарно утворюють робочі кути (рис. 1.7).

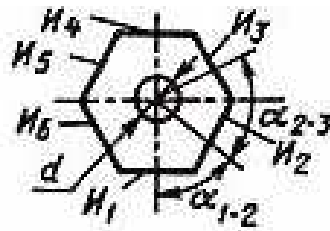


Рис. 1.7. 8-гранна призма ППБ 4-12-1 ГОСТ 2875-88: а) зовнішній вигляд, б) приклад креслення, де α – робочий кут, H – вимірювальна поверхня

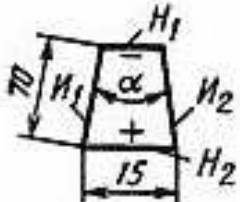
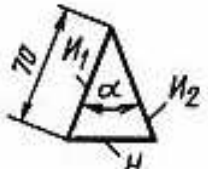
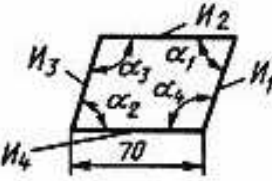
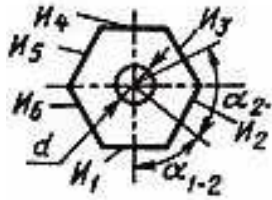
Робочі кути призм задані між перпендикулярами до вимірювальних поверхонь призм в площинах виміру. На верхніх поверхнях призм наносять і номінальні значення кутів в градусах від першої грані в напрямку, проти ходу годинникової стрілки.

Міри виготовляють наборами або окремими засобами наступних типів (табл. 1.1):

- 1 – з одним робочим кутом із зрізаною вершиною;
- 2 – з одним робочим кутом з гострою вершиною;
- 3 – з чотирма робочими кутами;
- 4 – правильна багатогранна (n -гранна) призма.

Таблиця 1.1

Основні розміри та класи точності типів мір

Тип міри	Креслення	Клас точності	Допустиме відхилення робочого кута від номінального значення	Діапазон вимірювання
1 – з одним робочим кутом із зрізаною вершиною		1	$\pm 10''$	Від 1° до 9°
		2	$\pm 30''$	
2 – з одним робочим кутом з гострою вершиною		1	$\pm 10''$	Від $15^\circ 10'$ до $75^\circ 50'$ Від 10° до 79° Від 15° до 16° Від 15° до $15^\circ 10'$
		2	$\pm 30''$	
3 – з чотирма робочими кутами		1	$\pm 10''$	80-81-100-99° 82-83-98-97° 84-85-96-95° 86-87-94-93° 88-89-92-91° 90-90-90-90°
		2	$\pm 30''$	
4 – правильна багатогранна (n-гранна) призма		0	$\pm 5''$	89°10'-89°20'-90°50'-90°40' 89°30'-89°40'-90°30'-90°20' 86°50'-89°59'-90°10'-90°01'
		1	$\pm 8''$	
		2	$\pm 15''$	

Міри при використанні в якості зразкових повинні пройти метрологічну атестацію. Повірка мір здійснюється відповідно до стандарту МИ 1758-87 “Державна система забезпечення єдності вимірювань. Міри плоского кута призматичні. Методика повірки”. При повірці в якості еталону застосовується еталон одиниці плоского кута 2 розряду по ГОСТ 8.016-81.

Відповідно до ГОСТ 8.016-81 первинний еталон одиниці плоского кута призначений для відтворення і зберігання одиниці плоского кута і передачі розміру одиниці за допомогою еталонів 2 розряду та зразкових засобів вимірювань робочим засобам вимірювань, що застосовуються в народному господарстві з метою забезпечення єдності вимірювань в країні [71, 72].

Державний первинний еталон відповідно до ГОСТ 8.016-81 містить кутомірну автоколімаційну установку та 12-гранну кварцову міру для контролю стабільності

показів еталону. Діапазон значень плоского кута, відтворюваних еталоном, становить $0 \div 360^\circ$ з дискретністю 10° . Державний первинний еталон забезпечує відтворення одиниці кута з середнім квадратичним відхиленням результату вимірювань σ_{ca} , що не перевищує $0,01''$ при 132 сукупних відносних вимірах 12-гранної призми. Невиключна систематична похибка Δ не перевищує $0,02''$.

Станом на 01.02.2019 р. в Україні в якості еталону кута використовується ДЕТУ 01-05-10. Номінальне значення або діапазон значень одиниці вимірювань, яку відтворює або зберігає еталон становить $0 \div 360^\circ$. Середнє квадратичне відхилення σ_{ca} результату вимірювань не перевищує $0,04''$. Невилучена систематична похибка не перевищує $0,04''$. ДЕТУ 01-05-10 створено ДП „Укрметртестстандарт” у 2010 р.

В інших країнах, наприклад, у Республіці Білорусь у 2000 р створено національний еталон плоского кута НЕ РБ 6-01 (БелГІМ) з невилученою систематичною похибкою, що не перевищує $0,03''$ (рис. 1.8). Середнє квадратичне відхилення σ_{ca} результату вимірювань не перевищує $0,02''$. Вища точність національного еталону плоского кута НЕ РБ 6-01 Республіки Білорусь порівняно із національним еталоном кута ДЕТУ 01-05-10 України забезпечується за рахунок використання цифрового автоколіматора ELCOMAT HR виробництва фірми “Möller-Wedel GmbH” (Німеччина). Характерною особливістю автоколіматорів фірми “Möller-Wedel GmbH” є наявність фоточутливих матриць. Результатом застосування фоточутливих матриць є висока точність. Так автоколіматори ELCOMAT 3000 та ELCOMAT HR мають роздільну здатність $0.005''$ та похибку від $0,1''$ до $0,01''$ [73].



Рис. 1.8. Національний еталон плоского кута НЕ РБ 6-01 Республіки Білорусь

В якості еталону одиниці плоского кута 2 розряду по ГОСТ 8.016-81 застосовують гоніометри та кутомірні установки, автоколіматори та кутові міри. Довірчі абсолютні похибки зразкових засобів вимірювань 2-го розряду при довірчій ймовірності 0,99 становлять від $\pm 0,4''$ до $\pm 2,0''$.

В Україні в якості еталону одиниці плоского кута 2 розряду застосовується кутовимірювальна система ГС-1Л вітчизняного виробництва [74, 75]. Номінальне значення або діапазон значень вимірювань $0 \div 360^\circ$. Середнє квадратичне відхилення $\sigma_{\text{са}}$ результату вимірювань не перевищує $0,18''$. Невилучена систематична похибка не перевищує $0,5''$.

1.1.3. Задача вимірювання величин плоского кута попередньої виставки навігаційних чутливих елементів

Навігаційні чутливі елементи (НЧЕ) – акселерометри та гравіметри – використовуються в сучасних системах орієнтації та навігації при керуванні рухом різних рухомих об'єктів – автомобілів, літальних апаратів різного призначення, системах керування артилерійськими снарядами (в стабілізаторах озброєння (рис. 1.9, рис. 1.10)) тощо, для контролю динаміки об'єкту, визначення координат місця його положення та орієнтації в просторі. Вони є головним елементом систем стійкості та безпеки руху – курсової стійкості, кермового керування, адаптивного круїз-контролю тощо.

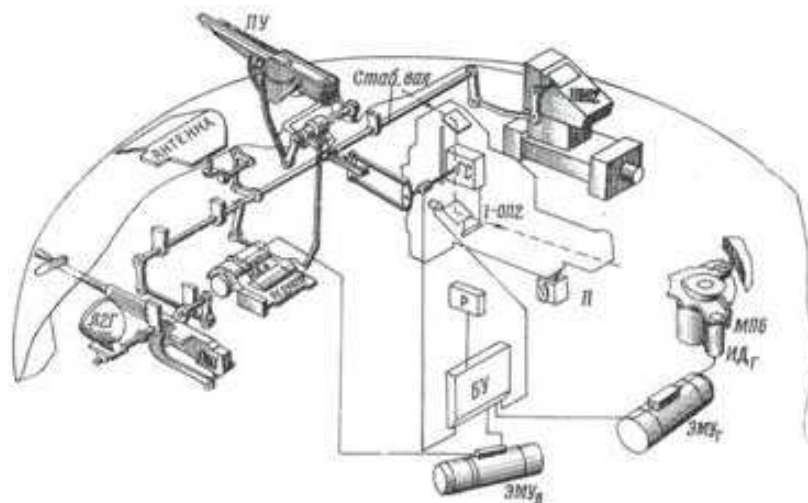


Рис. 1.9. Кінематична схема стабілізатора озброєння танків ІТ-1 [7]



Рис. 1.10. Стабілізатор озброєння

Особливість застосування НЧЕ (п'єзоелектричних акселерометрів, що випускаються промисловістю) полягає в проведенні вимірювань між акселерометром та конструкцією об'єкта, що вимагає відповідно попередньої виставки НЧЕ. При виставці НЧЕ необхідно орієнтувати його корпус таким чином, щоб робоча вісь (вісь найбільшої чутливості) співпала з напрямком вимірюваного віброприскорення, а напрямок мінімальної чутливості до коливань в поперечному напрямку співпадав з напрямком цих коливань. На рис. 1.11 схематично приведено приклад похибки встановлення НЧЕ.

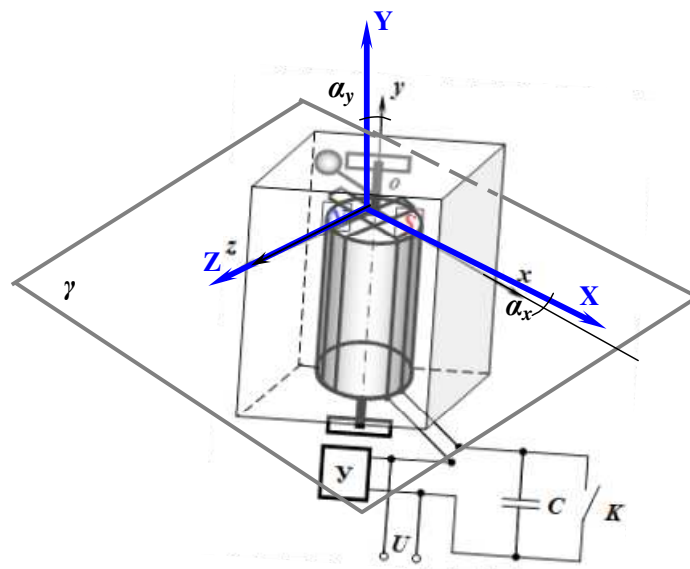


Рис. 1.11. Приклад похибки виставки НЧЕ (маятникового акселерометра)

Як видно із рис. 1.11, встановлений на площині γ НЧЕ має похибку обумовлену відхиленням його повздовжньої осі y від перпендикулярності до поверхні, з якою він повинен мати механічний контакт, для відповідних вимірювань прискорення та / або вібрації. Похибка на рис. 1.11 відображається кутом α_y відхилення осі y системи координат xyz акселерометра від осі Y абсолютної (опорної) системи координат XYZ .

Це призводить до зсуву нуля НЧЕ. Тому для визначення перпендикулярності встановлення НЧЕ необхідно попередньо проводити певні вимірювальні процедури – попередню виставку – із застосуванням спеціальних високоточних вимірювальних засобів. Крім того необхідним є калібрування НЧЕ для визначення величини інструментальної похибки навігаційної системи.

При проведенні попередньої виставки НЧЕ необхідно досягти колінеарності локальної системи координат xuz , зв'язаної з НЧЕ, відносно абсолютної наперед прийнятої системи координат (рис. 1.10), наприклад, декартової (ДСК) XYZ , нормальної географічної (НГСК) $X_{НГСК}Y_{НГСК}Z_{НГСК}$ або нормальної ортодромічної (НОСК) $X_{НОСК}Y_{НОСК}Z_{НОСК}$.

Варто вказати, що вибір абсолютної системи координат вимагає врахування умов задачі. Так ДСК застосовується тоді, коли можна знехтувати кривизною поверхні Землі – при порівняно невеликих переміщеннях об'єкту. Глобальні (НГСК, НОСК) СК, які жорстко зв'язані з Землею, застосовуються при значних переміщеннях об'єктів, коли траєкторія переміщення охоплює всю земну поверхню або значну її частину. Задати кутове положення об'єкту в просторі дозволяють кути Ейлера-Крилова – кути чистого повороту φ , прецесії θ та нутації ψ (рис. 1.12).

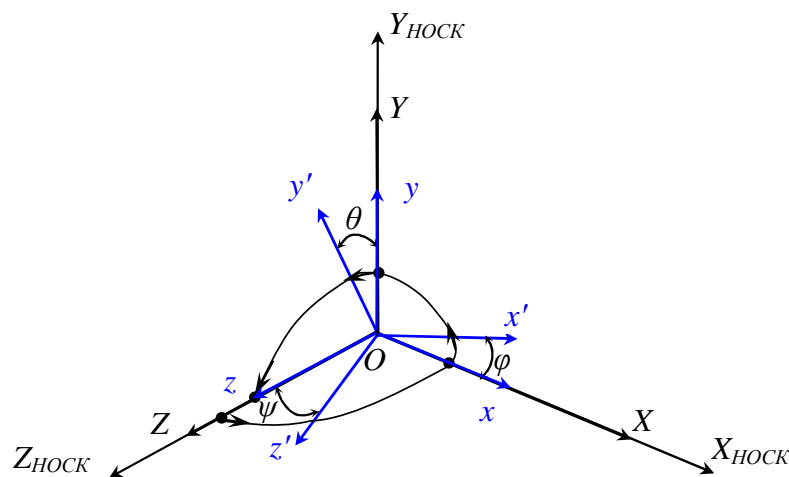


Рис. 1.12

Зв'язок сферичної ГСК з ДКС описується рівняннями виду:

$$\begin{aligned} x &= r \cdot \sin(\theta) \cos(\lambda); \\ y &= r \cdot \sin(\theta) \sin(\lambda); \\ z &= r \cdot \cos(\theta), \end{aligned} \tag{1.1}$$

де r – радіус вектор переміщення об'єкту;

θ – полярна відстань, яка змінюється в інтервалі від 0° до 180° ;

λ – довгота, яка змінюється в інтервалі від 0° до 360° .

При цьому при невеликих відстанях як окремий випадок НОСК застосовують ДСК. Тому, при попередній виставці НЧЕ, наприклад, за відомим методом з плоским розворотом [9] може бути обрана ДСК.

Виставка НЧЕ проводиться перед початком функціонування навігаційної системи. В літературі [8, 9, 9, 11, 12] описані різні способи початкової виставки НЧЕ – узгодження за вектором прискорення [8, 9], узгодження за вектором швидкості [9], кутове узгодження [9, 11, 12].

Вважається, що *спосіб кутового узгодження* дозволяє досягти більшої точності виставки. Цей спосіб передбачає порівняння кутового положення системи координат осей локальної системи координат хуз НЧЕ відносно осей абсолютної наперед прийнятої системи координат. Для цього здійснюється виставка осей локальної системи координат хуз НЧЕ відносно осей абсолютної наперед прийнятої системи координат: ДКС по осям OX , OY , OZ , або НГСК – по осям $OX_{\text{НГСК}}$, $OY_{\text{НГСК}}$, $OZ_{\text{НГСК}}$, або НОСК – по осям $OX_{\text{НОСК}}$, $OY_{\text{НОСК}}$, $OZ_{\text{НОСК}}$. Ця виставка повинна бути такою, щоб величина $\alpha_i \mid i \in \{\varphi, \theta, \psi\}$ відхилень кутів Ейлера-Крилова – чистого повороту φ , прецесії θ та нутації ψ , що задають положення осей локальної системи координат хуз НЧЕ, від осей абсолютної наперед прийнятої системи координат, дорівнювала нулю: $\alpha_i = 0$. Для того за *методом виставки з плоским розворотом* [9] навігаційна система встановлюється на поворотний стіл кутовимірального приладу, після чого тригранник α приладу, що утворюється осями локальної системи координат хуз, зв'язаної з НЧЕ, орієнтують відносно осей абсолютної системи координат, наприклад, НГСК, що утворюють тригранник α' (рис. 1.11). Далі проводиться виставка НЧЕ за заданим курсом і з моменту часу t_1 навігаційна система починає функціонувати в інерціальному режимі, залишаючись нерухомою відносно Землі. Після того, через деякий час t_2 , здійснюють відносно швидкий розворот корпусу НЧЕ відносно вертикальної осі OY і залишають установку знову нерухомою відносно Землі.

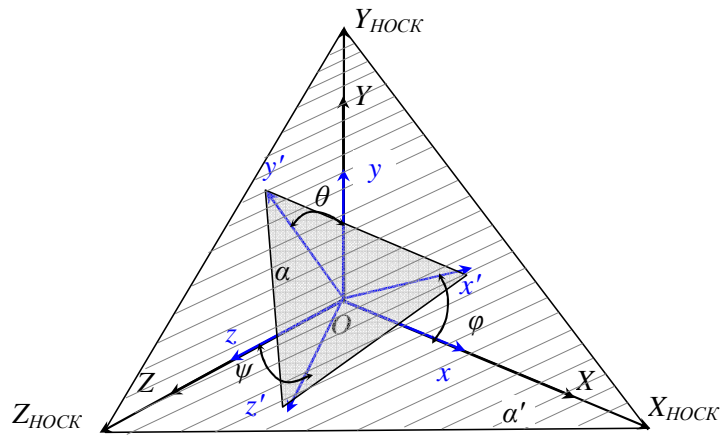


Рис. 1.13

Виставка тригранник α приладу по вертикальній осі OY або $OY_{\text{НГСК}}$ або $OY_{\text{НОСК}}$ наперед прийнятої абсолютної ДКС, НГСК або НОСК відповідно, здійснюється за допомогою відповідних датчиків вимірювання плоского кута або гоніометричних систем. Основна вимога, що висувається при цьому за відомими даними [9], полягає у забезпеченні високої точності виставки. Зокрема похибка вимірювання не повинна перевищувати десяті кутових секунд.

1.2. Аналіз факторів, що впливають на появу похибок вимірювання величини плоского кута попередньої виставки навігаційних чутливих елементів

Причини виникнення похибок початкової виставки НЧЕ обумовлюються неортогональністю осей вимірювальних елементів НЧЕ, обмеженою чутливістю НЧЕ [8], та задаються похибками вимірювальних засобів, що використовуються для калібрування та попередньої виставки НЧЕ, а також похибками вимірювання значень кута та рухом об'єкту. Аналіз цих похибок дозволяє сформулювати вимоги до засобів вимірювання, що повинні використовуватись для початкової виставки НЧЕ.

1.2.1. Аналіз впливу методу опису орієнтуючих рухів НЧЕ при їх попередній виставці

Якщо розуміти під попередньою виставкою НЧЕ визначення взаємного положення осей локальної системи координат xuz НЧЕ, відносно осей абсолютної наперед прийнятої системи координат $OXYZ$ ДКС або $OX_{\text{НГСК}}Y_{\text{НГСК}}Z_{\text{НГСК}}$ НГСК, або $OX_{\text{НОСК}}Y_{\text{НОСК}}Z_{\text{НОСК}}$ НОСК, та виконання деякої

множини кутових поворотів (орієнтуючих рухів) у випадку нерівності нулю $\alpha_i \neq 0$ величини $\alpha_i \mid i \in \{\varphi, \theta, \psi\}$ відхилень кутів Ейлера-Крилова φ, θ та ψ , що задають положення осей локальної системи координат $x_{\text{ЛЧЕ}}$, від осей абсолютної наперед прийнятої системи координат, то величина похибки може обумовлюватись прийнятим методом опису цих орієнтуючих рухів. Так, основними методами опису орієнтуючих рухів є табличні, на основі матриць поворотів, із застосуванням кутів Ейлера-Крилова, на основі кватерніонів.

Табличні методи [13, 14, 15, 16] базуються на представленні орієнтуючих рухів ОВ за допомогою матриць поворотів B_x, B_y, B_z , що описують повороти НЧЕ відносно осей абсолютної системи координат, наприклад, $OXYZ$ ДКС або $OX_{\text{НГСК}}Y_{\text{НГСК}}Z_{\text{НГСК}}$ НГСК, або $OX_{\text{НОСК}}Y_{\text{НОСК}}Z_{\text{НОСК}}$ НОСК відповідно:

$$B_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; B_y = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$B_z = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1.2)$$

де φ, γ, β – кути поворотів НЧЕ відносно відповідних осей попередньо обраної абсолютної системи координат, наприклад, OX, OY, OZ системи координат.

Загальна матриця обертання, яка відображає процес орієнтування НЧЕ, тобто встановлення координатних орт i_L, j_L, k_L осей ox', oy', oz' системи координат, зв'язаної з НЧЕ, компланарно координатним ортам i, j, k осей OX, OY, OZ абсолютної системи координат, визначається таким чином:

$$B = B_x \cdot B_y \cdot B_z = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & -\cos \beta \sin \gamma & \sin \beta & 0 \\ \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma + \cos \varphi \sin \gamma & -\sin \varphi \sin \beta \sin \gamma + \cos \varphi \cos \gamma & -\sin \varphi \cos \beta & 0 \\ -\cos \varphi \sin \beta \cos \gamma + \sin \varphi \sin \gamma & \cos \gamma \sin \beta \sin \gamma + \sin \varphi \cos \gamma & \cos \varphi \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Умовою закінчення виставки НЧЕ є компланарність розташування координатних орт i_L, j_L, k_L осей ox', oy', oz' системи координат, зв'язаної з НЧЕ, відносно координатних орт i_0, j_0, k_0 осей OX, OY, OZ абсолютної системи координат, а вектор \vec{r} та направляючі косинуси $\cos \alpha_x, \cos \alpha_y, \cos \alpha_z$ (кутів між вектором \vec{r} та осями координат OX, OY, OZ) дорівнюють нулю. Таким чином,

формалізований опис кутових орієнтуючих рухів (КОР) має вид [17]:

$$i_1 \times i_0 \neq 0; j_1 \times j_0 \neq 0; k_1 \times k_0 \neq 0; \cos \alpha_x \neq 0; \cos \alpha_y \neq 0; \cos \alpha_z \neq 0; \vec{r} \neq 0. \quad (1.4)$$

Формалізований опис КОР має вид:

$$i_1 \times i_0 = 0; j_1 \times j_0 = 0; k_1 \times k_0 = 0; \cos \alpha_x = 0; \cos \alpha_y = 0; \cos \alpha_z = 0; \vec{r} = 0. \quad (1.5)$$

Опис розташування координатних орт i_l, j_l, k_l осей ox', oy', oz' системи координат, зв'язаної з НЧЕ, відносно координатних орт i_0, j_0, k_0 осей OX, OY, OZ абсолютної системи координат представляється у виді:

$$i, j, k; -k, j, i; j, k, -i; -k, -i, j; -i, -k, -j. \quad (1.6)$$

Графічне представлення описаного приведено на рис. 1.14.

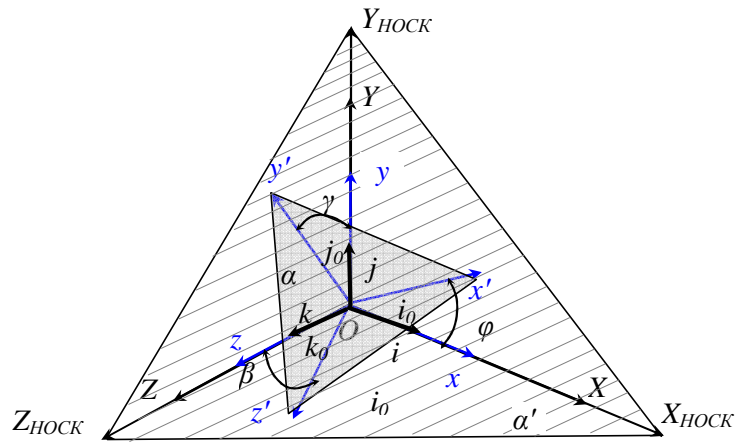


Рис. 1.14

Метод, заснований на використанні **матриць поворотів із застосуванням кутів Ейлера-Крилова** [18], є більш універсальним щодо представлення процесу орієнтування НЧЕ порівняно з вище описаним методом.

Послідовність кінцевих поворотів НЧЕ при його орієнтації для виставки описується узагальнюючими координатами із використанням кутів Ейлера (кутів чистого повороту φ , прецесії θ та нутації ψ (рис. 1.11)), які описують відносне положення осей локальної системи координат, зв'язаної з НЧЕ, відносно абсолютної системи координат. Кути $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ між осями ox, oy, oz локальної системи координат НЧЕ та осями OX, OY, OZ абсолютної системи координат, відносно осей якої здійснюється виставка (орієнтування), визначаються шляхом перерахування елементів головної діагоналі матриці R , отриманої із добутку матриць поворотів, що описують повороти НЧЕ відносно осей OX, OY, OZ

абсолютної системи координат. Таким чином, матриця R описує обертання НЧЕ в тривимірному евклідовому просторі:

$$R = R_{x,\varphi} \cdot A_{y,\theta} \cdot A_{z,\psi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta \cdot \cos \psi & -\cos \theta \cdot \sin \psi & \sin \theta \\ \sin \varphi \cdot \sin \theta \cdot \cos \psi + \cos \varphi \cdot \sin \psi & -\sin \varphi \cdot \sin \theta \cdot \sin \psi + \cos \varphi \cdot \cos \psi & -\sin \varphi \cdot \cos \theta \\ -\cos \varphi \cdot \sin \theta \cdot \cos \psi + \sin \varphi \cdot \sin \psi & \cos \varphi \cdot \sin \theta \cdot \sin \psi + \sin \varphi \cdot \cos \psi & \cos \varphi \cdot \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (1.7)$$

де φ – кут чистого повороту, описує обертання НЧЕ відносно осі OX ;

θ – кут прецесії, описує обертання НЧЕ відносно осі OY ;

ψ – кут нутації, описує обертання НЧЕ відносно осі OZ .

Елементи головної діагоналі матриці R (1.6) є косинусами кутів α_x , α_y , α_z , значення яких визначається наступним чином:

$$\begin{aligned} \alpha_x &= \arccos(\cos \theta \cdot \cos \psi); \\ \alpha_y &= \arccos(-\sin \varphi \cdot \sin \theta \cdot \sin \psi + \cos \varphi \cdot \cos \psi); \\ \alpha_z &= \arccos(\cos \varphi \cdot \cos \theta). \end{aligned} \quad (1.8)$$

Метод, заснований на використанні математичного апарату **кватерніонів** [8, 19, 20] для опису переміщень НЧЕ при їх попередній виставці (орієнтуванні) дозволяє спростити математичну форму представлення цих переміщень та безпосередньо визначити їх геометричні характеристики: лінійні координати, напрямки, величину, вісі та кути поворотів. Множина рухів, необхідних для виставки системи координат $x y z$, зв'язаної з НЧЕ, відносно абсолютної системи координат $X Y Z$ з базисом i, j, k (рис. 1.13) може бути представлена відомою функцією кутових орієнтуючих рухів [21, 22], яка полягає у перетворенні $\Omega(v; \omega): C \rightarrow (v; \omega)$ кінцевої множини поворотів НЧЕ, що орієнтується у просторі C , в кінцеве наперед задане положення $(v; \omega)$, де v, ω – відповідно вектор відносних поворотів та кутові координати НЧЕ. Результатом деякої послідовності кутових поворотів НЧЕ в абсолютній системі координат, наприклад, XYZ , є поворот НЧЕ на деякий кут $\omega \in (\varphi, \theta, \psi)$ відносно осі, що колінеарна одиничному вектору v (рис. 1.13). Причому, загальна функція кутових рухів НЧЕ може бути

представлена кватерніоном: $q(v, \omega) = \cos \frac{\omega}{2} + v \cdot \sin \frac{\omega}{2}$, а послідовність цих рухів, що описана добутком відповідних кватерніонів, представлених виразом (1.9):

$$\begin{aligned} q_1(v; \varphi) &= \cos \frac{\varphi}{2} + i \cdot \sin \frac{\varphi}{2}, \\ q_2(v; \theta) &= \cos \frac{\theta}{2} + j \cdot \sin \frac{\theta}{2}, \\ q_3(v; \psi) &= \cos \frac{\psi}{2} + k \cdot \sin \frac{\psi}{2}. \end{aligned} \quad (1.9)$$

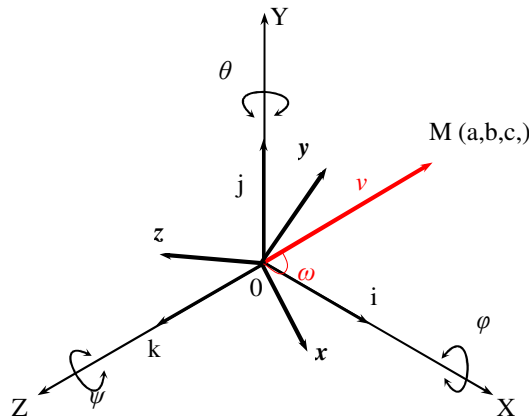


Рис. 1.15

Порівняльний аналіз методів формалізованого опису орієнтуючих рухів НЧЕ при їх попередній виставці приведені в табл.1.1. Із таблиці видно, що більш досконалим методом представлення поворотів НЧЕ, при їх попередній виставці, можна вважати метод із застосуванням математичного апарату кватерніонів. Це обумовлюється можливістю виконання порівняно невеликих математичних обчислень при його застосуванні і відповідно призводить до зменшення витрат часу та підвищення продуктивності виконуваних обчислень при попередній виставці НЧЕ.

При цьому варто відзначити, що *точність виставки буде мало залежати від методу формалізованого опису орієнтуючих рухів НЧЕ при одноразовому вимірюванні. Проте при багаторазових вимірюваннях точність виставки буде залежати від похибки округлень результатів обчислень, яка накопичується від вимірювання до вимірювання та може досягати досить великих значень. Тому при виставці НЧЕ для задавання геометричних параметрів руху системи координат НЧЕ варто застосовувати такий метод, що не вимагає виконання значної множини математичних операцій, наприклад, такий, що базується на застосуванні математичного апарату кватерніонів.*

Таблиця 1.1

Порівняльний аналіз відомих методів формалізованого опису орієнтуючих рухів НЧЕ при їх попередній виставці

Назва методу, автор		Табличний метод [13, 14, 15, 16]	Метод з використанням кутів Ейлера-Крилова [18]	Пропонований метод з використанням теорії кватерніонів [21, 22]
Опис методу				
форма представлення		φ (град); γ (град); β (град)	φ (град); θ (град); ψ (град)	φ (град); θ (град); ψ (град)
		$\cos \alpha_x = 0$; $\cos \alpha_y = 0$; $\cos \alpha_z = 0$	φ (град); θ (град); ψ (град)	v ; ω (град)
Етапи обчислення	I	Визначення колінеарності векторів: $i_1 \times i_0 \neq 0$; $j_1 \times j_0 \neq 0$; $k_1 \times k_0 \neq 0$; $\cos \alpha_x \neq 0$; $\cos \alpha_y \neq 0$; $\cos \alpha_z \neq 0$ $r \neq 0$	Задавання значень кутів φ , θ , ψ та напрямку орієнтуючих рухів для переміщення з ПОП у КОП	Визначення загального кватерніону, що відображає повороти НЧЕ
	II	Визначення загальної матриці обертання, що відображає повороти НЧЕ	Визначення загальної матриці обертання, що відображає повороти НЧЕВ з використанням кутів φ , θ , ψ	Визначення кута повороту ω НЧЕ відносно вісі, положення якої задає вектор v
	III	Визначення напрямних косинусів $\cos \alpha_x$, $\cos \alpha_y$, $\cos \alpha_z$	Формалізоване представлення рухів	Визначення значень кутів φ , θ , ψ
	IV	Визначення умови колінеарності векторів: $i_1 \times i_0 = 0$; $j_1 \times j_0 = 0$; $k_1 \times k_0 = 0$; $\cos \alpha_x = 0$; $\cos \alpha_y = 0$; $\cos \alpha_z = 0$; $r = 0$	—	—
ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ ПОКАЗНИКИ		24 операції множення, 15 операцій додавання, 3 операції визначення арккосинусів кутів [16]	30 операції множення, 15 операцій додавання, 3 операції визначення арккосинусів кутів [18]	16 операцій множення, 12 операцій додавання, 1 операція визначення арккосинусу кута [19, 20]

1.2.2. Аналіз впливу інструментальних похибок засобів кутових вимірювань на точність виставки НЧЕ

Якщо припустити, що основа обертового пристрою предметного столу кутовимірювального засобу, на якому встановлено НЧЕ, не піддається впливу вібрацій та є нерухомою відносно Землі, то можна стверджувати, що на похибку виставки НЧЕ впливає недосконалість технологічного процесу виготовлення кутовимірювального приладу, експлуатаційна зміна параметрів та характеристик конструкційних матеріалів і складових елементів вимірювальної системи, зовнішні та внутрішні збурення (наприклад, електромагнітні поля, температура, волога, нестабільність напруги живлення тощо), що призводить до періодичної зміни параметрів системи в цілому і впливає на її функцію перетворення $Y(t) = f(X(t))$ (рис. 1.16).

Приведений в [24] аналіз показав, що інструментальна похибка Δy_I може виникати через множину різних причини та відповідно мати множину різних складових, опис яких приводиться нижче.

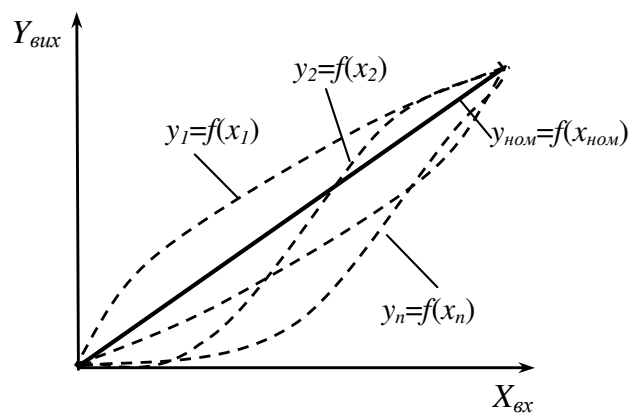


Рис. 1.16. Графічна форма представлення функції перетворення

1. *Виробничо-технологічні відхилення метрологічних параметрів A_i кутовимірювального приладу від номінальних значень, що виникають внаслідок похибок виготовлення деталей, конструкцій, вузлів і обумовлюється частковими похибками окремих складових елементів $\Delta_I = f(\Delta_j \mid j = \overline{1, J})$, де j – складові елементи кутовимірювального приладу, як складної багаторівневої вимірювальної системи, що містить первинні перетворювачі, пристрої перетворення та обробки інформації, пристрої зв'язку або передачі інформації, пристрої зберігання та*

відображення інформації.

В свою чергу відхилення метрологічних параметрів A_m приладу залежать від множини виробничо-технологічних параметрів q_k технології Q виготовлення j -их складових та системи в цілому: $A_i = f(Q)$, $m = \overline{1, M}$; $Q \supset \{q_k\}$, $k = \overline{1, K}$ та обумовлюються наступним:

1) не ідентичністю технологічних процесів і первинних компонентів, що використовуються при виробництві матеріалів для деталей і вузлів, що призводить до розкиду фізичних параметрів, які характеризують властивості цих матеріалів (густини, масової частки електричного опору, концентрації домішок в напівпровідниках, показника заломлення оптичних елементів тощо) [23];

2) недосконалістю технологічних процесів і точністю технологічного обладнання, яке застосовується при виготовленні деталей і елементів приладів, що викликає відхилення геометричних форм та розмірів деталей і елементів [23];

3) недосконалістю складальних, регулювальних і контрольних пристроїв і технологічних операцій, що обумовлює похибки вузлів і приладів при їх складанні, юстируванні, регулюванні [23].

В наслідок відхилення параметрів приладу від номінальних значень через виробничо-технологічні відхилення процесів виробництва, істинна функція перетворення відрізняється від номінальної, тому виникає так звана виробничо-технологічна похибка $\Delta y_{\text{вт}}$, що може бути визначена за виразом запропонованим в літературі [23] наступним чином:

$$\Delta y_{\text{вм}} = \sum_{k=1}^K \left(\frac{dy_{\text{вм}}}{dy_{k \text{ вт}}} \right) \Delta y_{k \text{ вт}} = \sum_{k=1}^K B_k \Delta y_{k \text{ вт}}, \quad (1.10)$$

де $\Delta y_{\text{вт}}$ – похибка внаслідок виробничо-технологічних відхилень процесу виробництва;

$B_k = \left(\frac{dy_{\text{вм}}}{dy_{k \text{ вт}}} \right)$ – коефіцієнти впливу, що обчислюються при номінальних

значеннях q_k -го виробничо-технологічного параметру приладу;

$\Delta y_{k \text{ вт}}$ – первинна похибка параметру q_k , $\Delta y_{k \text{ вт}} = (y_k - y_{k0})$.

2. *Шуми та завади різної природи*, що призводять до появи похибок інформаційних сигналів приладу. Їх причинами можуть бути:

1) помилки або шум квантування вихідного сигналу $\Delta y_{ш}^{\kappa}$, що виникають при його оцифровуванні (наприклад, внаслідок округлення до певного розряду або відкидання молодших розрядів сигналу);

2) внутрішні шуми елементів електронних схем $\Delta y_{ш}^e$ (наприклад, шуми приймачів оптичного випромінювання, опорів, активних елементів: транзисторів, мікросхем тощо) [23];

3) паразитні ємнісні і індуктивні зв'язки $\Delta y_{ш}^{CL}$ [23];

4) опори витікання $\Delta y_{ш}^r$ (наприклад, по поверхні скла колби фотоелемента і т. п.) [23];

5) паразитні термо-ЕРС $\Delta y_{ш}^{tE}$, що виникають у точках з'єднання різнорідних провідників [23];

6) фотонний шум $\Delta y_{ш}^{\Phi}$ [23].

Внаслідок цього виникає так звана похибка шуму $\Delta y_{ш}$, що може бути визначена за наступним виразом:

$$\Delta y_{ш} = \sum \Delta y_{ш}^x, \quad (1.11)$$

де $\Delta y_{ш}$ – похибка шуму;

$\Delta y_{ш}^x$ – первинні складові похибки шуму; $x \in \{\kappa, e, CL, r, tE, \Phi\}$ – скорочене умовне позначення шуму квантування, шуму елементів електронних схем, паразитних ємнісних і індуктивних зв'язків, опоры витікання, паразитних термо-ЕРС, фотонного шуму відповідно.

3. *Зовнішні $F(t)$ та внутрішні $F'(t)$ збурення*, обумовлюють виникнення так званої похибки збурення $\Delta y_{F, F'}$.

До зовнішніх збурень $F(t)$, що діють на гоніометр можна віднести зовнішні динамічні впливи, наприклад, мікровібрації, струси та ін., що викликають кутові коливання основи гоніометра та визначають тенденцію зміни кута положення основи гоніометра, також до зовнішніх збурень можна віднести впливи

електричних та магнітних полів тощо.

До внутрішніх збурень $F'(t)$ можна віднести тертя в опорах, напрямних та шарнірних з'єднаннях рухомих частин вимірювальної системи, їх невідновуваність, сили та моменти, що виникають при взаємодії рухомої системи з внутрішніми магнітними та електричними полями [23].

Крім того величина інструментальної похибки при проходженні сигналу через вимірювальний канал з відповідною передавальною функцією $f(x)$ (функцією перетворення) може збільшуватись або зменшуватись в залежності від коефіцієнтів чутливості $K_{xj} \mid j = \overline{1, J}$, j -их елементів гоніометра до факторів

впливу, що були розглянуті вище: $K_{xj} = \frac{df(x_j)}{dx_j}$, де x_j – вхідний сигнал деякого j -го елементу вимірювального приладу.

В результаті інструментальна похибка може бути представлена наступним виразом:

$$\Delta y_I = \Delta y_{BT} + \Delta y_{III} + \Delta y_{F,F'}, \quad (1.12)$$

де Δy_I – інструментальна похибка;

Δy_{BT} – виробничо-технологічна похибка;

Δy_{III} – похибка шуму;

$\Delta y_{F,F'}$ – похибка збурення.

1.2.3. Аналіз впливу методів проведення вимірювань та обробки отриманих результатів на точність виставки НЧЕ

Похибка, що обумовлюється недосконалістю методів проведення вимірювань та обробки отриманих результатів призводить до появи такої складової систематичної похибки вимірювань, яку називають *методичною похибкою* Δy_M .

Проведений аналіз [24, 25] показав, що методична похибка Δy_M може бути обумовлена *похибкою використовуваного методу повірки та градування* власне кутовимірювального приладу при застосуванні зразкових засобів вимірювання, наприклад, багатогранних призм, тобто в обумовлена *параметрами об'єкта*

вимірювання зокрема неточними геометричними формами та розмірами: відхиленням від прямолінійності Δy_M^P (рис. 1.15, а), відхиленням від площинності Δy_M^{Pl} (рис. 1.17, б), відхиленням від паралельності Δy_M^{Pr} поверхонь (рис. 1.17, в), відхиленням кута Δy_M^{Rot} (рис. 1.17, г).

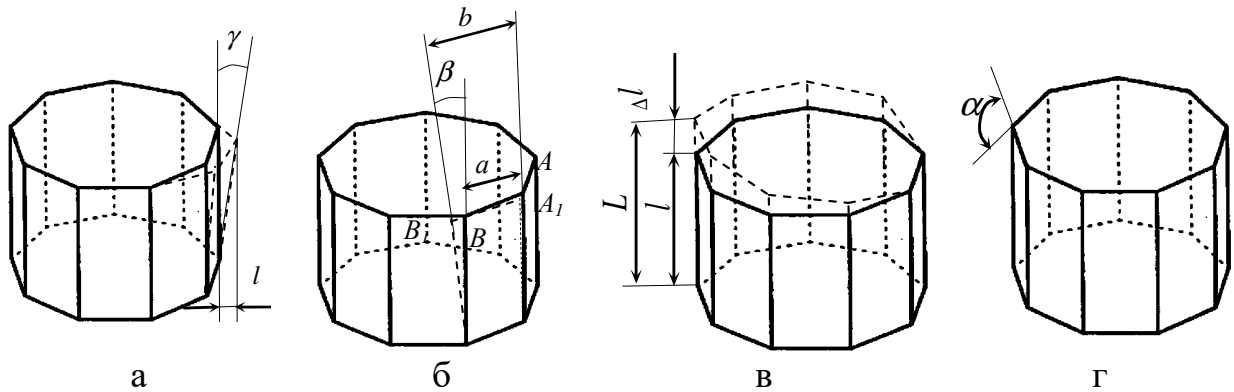


Рис. 1.17. Види відхилень геометричної форми та розмірів зразкових об'єктів вимірювання

Також методична похибка може бути обумовлена недосконалістю методу *обробки результатів вимірювання* та виникати внаслідок округлення результатів обчислення, недотримання методик вимірювання, обчислення і нормування складових похибок вимірювання. Процедури обробки результатів вимірювань, а також нормування систематичних та випадкових складових похибок вимірювання відомі, мають багаторічну практику застосування, добре обґрунтовані, максимально формалізовані, є принципово різними та регламентуються відповідними нормативними документами [26, 27]. При цьому процедури нормування та підсумовування систематичних та випадкових складових похибок є принципово різними. Зокрема, відповідно до стандарту [26] похибки підсумовують одним із трьох способів – алгебраїчним, геометричним, з врахуванням кореляції. Зокрема при наявності випадкової складової похибки вимірювання використовують геометричне підсумовування. При наявності систематичної складової похибки вимірювання вибір способу підсумовування є неоднозначним. Це обумовлюється відсутністю повної інформації про закон її розподілення. В такому випадку вибір способу підсумовування проводять виходячи з міркувань ймовірності виникнення небезпеки життю людей, значних економічних збитків, техногенних катастроф тощо. Як правило в такому випадку

використовують алгебраїчний спосіб, хоча це досить часто призводить до завищеної оцінки величини похибки. Тому важливим є визначення якої саме складової похибки міститься у множині вимірювальних даних. Для цього застосовують відповідні методи. Так у вітчизняній [28] та в зарубіжній [29] літературі наводяться аналітично-розрахункові методи, що базуються на застосуванні дисперсійного критерію Фішера та критерію Вілкоксона. Дисперсійний критерій Фішера дозволяє встановити факт наявності систематичної складової похибки вимірювання та проаналізувати джерела її виникнення, а критерій Вілкоксона застосовується для виявлення систематичної складової похибки вимірювання при невідомому законі розподілення результатів вимірювання. Вважається, що найбільш ефективним є застосування дисперсійного критерію Фішера. При цьому науковці у своїх роботах [28, 29] вказують, що визначення складових похибок вимірювання із застосуванням цих аналітично-розрахункових методів є багатоетапним [28] і рутинним [29] та, відповідно, досить трудомістким процесом, що вимагає значних витрат часу. Застосування аналітично-розрахункової процедури визначення складових похибок вимірювання із застосуванням дисперсійного критерію Фішера передбачає виконання 13 кроків на кожному з яких проводяться відповідні математичні обчислення, що очевидно передбачає округлення результатів розрахунків. Узагальнена блок-схема алгоритму, що ілюструє роботу цієї аналітично-розрахункової процедури, приведена на рис. 4.1 (див. розділ 4).

Окрім досить значної трудомісткості виконуваних робіт при використанні вказаного алгоритму додатково виникає похибка округлення, яка має властивість накопичуватись і її значення та вплив може бути досить суттєвим.

На основі приведеного методична похибка Δy_M може бути описана наступним виразом:

$$\Delta y_M = \sum \Delta y_M^k + \sum \Delta y_M^r, \quad (1.13)$$

де Δy_M – методична похибка;

Δy_M^k – складові методичної похибки обумовлені параметрами об'єкта вимірювання; $k \in \{P, Pl, Pr, Rot\}$ – скорочене умовне позначення відхилення від прямолінійності, відхилення від площинності,

відхилення від паралельності поверхонь, відхилення кута відповідно;

Δy_M^r – складові методичної похибки обумовлені особливістю обробки результатів вимірювання – округленням проміжних результатів обчислень, недотриманням методик вимірювання, обчисленням і нормуванням складових похибок вимірювання.

1.2.4. Аналіз впливу оператора на точність виставки НЧЕ

Індивідуальні фізіологічні властивості оператора, що проводить вимірювання, або його укорінені неправильні навички обумовлюють виникнення *суб'єктивної похибки* Δy_S або *похибки оператора*. Вона залежить від ретельності роботи та кваліфікації особи, що проводить вимірювання та може бути обумовлена:

1) неточністю або похибкою базування Δy_S^δ контрольованого об'єкта вимірювання, наприклад, багатогранної призми на предметному столі приладу (рис. 1.18);

2) похибкою наведення Δy_S^n ;

3) похибкою відліку Δy_S^v .

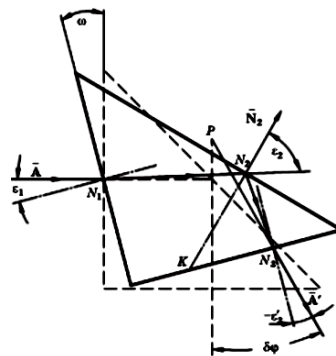


Рис. 1.18. Похибка базування

Внаслідок цього виникає суб'єктивна похибка Δy_S , що може бути визначена за наступним виразом:

$$\Delta y_S = \sum \Delta y_S^j, \quad (1.14)$$

де Δy_S – суб'єктивна похибка;

Δy_S^j – первинні складові суб'єктивної похибки; $j \in \{\delta, n, v\}$ – скорочене

умовне позначення похибки базування, похибки наведення та похибки відліку відповідно.

Для того, щоб зменшити або взагалі усунути суб'єктивні похибки необхідно забезпечити точне дотримання інструкцій та методик проведення експерименту та обробки результатів вимірювання. Це може бути досягнуто за рахунок автоматизації вимірювальних процедур, що сприяє виключенню суб'єктивних похибок, а також підвищує швидкість та зменшує трудомісткість виконуваних робіт.

1.2.5. Загальні рекомендації щодо зменшення похибки вимірювання величини плоского кута

Таким чином, на основі приведеного можна стверджувати, що точність вирішення задачі початкової виставки НЧЕ обумовлюється точністю вимірювальних засобів та процедури вимірювання в цілому, а помилки початкової виставки визначаються похибками вимірювальних засобів, суб'єктивними похибками оператора та рухом об'єкту.

Тому шляхами підвищення точності можуть бути:

1. Удосконалення відомих та / або розробка нових високоточних (прецизійних) засобів вимірювання. Це дозволяє значно підвищити точність, проте є досить витратним способом;

2. Удосконалення методів вимірювання, обчислювальних алгоритмів та інших процедур, що дозволяє забезпечити задану точність менш витратними, проте не менш ефективними способами;

3. Застосування додаткових спеціальних заходів – підвищення вимог до кваліфікації персоналу, жорсткого дотримання графіків повірки обладнання, ретельністю виконання типових та сертифікаційних досліджень та дотриманням методик вимірювання, обчислення і нормування складових похибок вимірювання.

При цьому варто зазначити, що найбільшої результативності можна досягти тільки за рахунок комплексного підходу до виконання вище приведеного із застосуванням новітніх досягнень науки і техніки, передових інформаційно-комп'ютерних технологій та автоматизації.

1.3. Аналіз та загальна характеристика відомих сучасних методів та засобів вимірювання величин плоских кутів

1.3.1 Загальний аналіз відомих сучасних засобів вимірювання величин плоских кутів

Проблема підвищення точності кутових вимірювань уходить своїм корінням в глибину 18 ст. Так у 1809 р. Уїльямом Волластоном (Англія) було створено одноколовий відбиваючий гоніометр, у 1889 р. Євграфом Федоровим (Царська Росія) створено двоколовий універсальний (теодолітний) гоніометр, у 1893 р. Віктором Гольдшмідтом, Зігфрідом Чапським (Німеччина) створено нову модель двоколового гоніометра.

Свого розвитку дана проблема набуває за часів Радянського Союзу. В цей час питаннями підвищення точності кутових вимірювань займалися наступні вчені Філатов Ю. В., Павлов П. А., Зайцев І. І., Зозуля Л. Г., Ванюрихін А. І., Кравченко В. І., Левченко Є. Г., Борисюк Л. В., Демчук В. Ю., Балла А. А., Виноградов Е. Ф., Аксененко В. Д., Тучин В. В., Апенко М. І., Афанасьєв В. А., Аникст Д. А., Константинович К. М., Меськин І. В., Мейко Б. С., Домрачев В. Г., Шляндин В. М., Бичков С. І., Лук'янов Д. П., Шестопапов Ю. Н., Мардіа К. С., Бакаляр А. І., Ахметжанов А. А., Батраков, А. С., Бутусов М. М., Бурнашев М. Н., Сапегин А. Г., Богуславський М. Г., Шарова Є. Є., Федотова І. І., Гречко Ф. М., Смирнова І. І., Стракун Г. Н., Кудрявцев М. Д., Грановський В. А., Казаков А. Я., Сірая Т. Н., Мейко Б. С., Щербань В. І. та ін. Результати цих досліджень відображені у відповідних дисертаційних роботах [45, 46, 47], патентах на винаходи та авторських свідоцтвах [31 – 44, 48 – 51], а також інших наукових виданнях [52 – 73, 80, 81, 82, 83].

Дослідження щодо підвищення точності кутових вимірювань продовжують розвиватися в наш час. Роботи у галузі підвищення точності кутових (гоніометричних) вимірювань проводяться в таких наукових центрах України як “КПІ ім. Ігоря Сікорського”, КП СПБ “Арсенал”, ПАТ “НВО “Київський завод автоматики”. Зокрема в Україні даними питаннями займаються такі науковці, як Лихоліт М. І., Безвесільна О. М., Зайцев І. І., Осадчий Е. П., Чіковані В. В., Орнадський Д. П., Седаліщев В. Н., Патрушев Е. М., Мухин В. М.,

Застрогин Ю. Ф., Шарапов В. М., Маляров С. П., Петренко О. В., Бартошинський З. В., Щербань В. І., Яценко Ю. О., Коваленко В. А. та ін. Результати досліджень відображені у наукових виданнях [80 – 87, 128, 135] та патентах [75 – 79, 88 – 91].

Роботи у галузі кутових (гоніометричних) вимірювань проводяться закордоном, зокрема в США (компанією Brookhaven Instruments Corporation) та Європі, зокрема в Німеччині (компаніями Trioptics, DataPhysics Instruments GmbH, Moeller-Wedel), Великобританії (компанією Renishaw), Франції (компанією GBX), Фінляндії (компаніями Kibron Inc., Kruss GmbH, KSV Instruments Ltd) та ін. наступними науковцями Julia F Glatthorn, Wan Fong Huang, Shuler M., Gebelin H., Andrews D. F., Bickel P. J., Hampel F. R., Huber P. J., Rogers W. H, Tu-Key J., Gauss C. F., Glissman T., Moritz H., Nabauer M., Saastamoinen J., Tengstrom E., Williams D., Simone Stauffacher, Wittke H., Filyaevskih R. I., Gan M. A., Rehan K., Sultana S., Zubair Khan M., Farooq Z., Mateen A., Nicola A Maffiuletti, Hans Gerber, Humayun M., Francesco Capitelli, Provenzano M. R., Francesco Colao, Nicola Senesi, Prasoon Diwakar, Pramod Kulkarni, Eileen Birch M., Achouri M., Baba-Hamed T., Beldjilali S. A., Belasr A., Kazunori Akizuk, Kazuto Yamaguchi, Yoshiyuki Morita, Yukari Ohashi, Silvio Nussbaumer, Michael Leunig та ін., результати досліджень яких приводяться в літературі [13, 29, 110, 113 – 116, 118, 120, 123 – 126, 150 – 166]. У ближньому зарубіжжі, наприклад, у Санкт-Петербурзькому університеті ЛЕТІ під керівництвом професорів Філатова Ю. В. та Павлова П. А. сформувалася наукова школа, яка займається питаннями високоточних гоніометричних вимірювань. Зокрема свій внесок у вирішення проблеми підвищення точності гоніометричних вимірювань разом із Філатовим Ю. В. та Павловим П. А. зробили Агапов М. Ю., Аксененко В. Д., Анікст Д. А., Апенко М. І., Афанасьєв В. А., Ахметжанов А. А., Бакаляр А. І., Батраков, А. С., Бичков С. І., Блантер В. Е., Богомолів М. Н., Богуславський М. Г., Бохман Е. Д., Бурнашев М. Н., Бутусов М. М., Кудрявцев М. Д., Матасов А. І., Тихомиров В. В. та ін. За результатами досліджень з даного напрямку опублікована низка наукових праць та дисертаційних робіт [2, 23, 92 – 101, 128, 129, 137, 138, 139, 140 – 149].

Аналіз результатів наукових досліджень, патентів на винаходи та корисні моделі приладових систем для вимірювання величин плоских кутів за останні десятиліття дозволяє стверджувати, що ключовими проблемами при створенні

перспективних гоніометричних систем залишаються:

1. Недостатня точність вимірювань кутів [2, 5, 29 – 45, 47, 48, 49, 51 – 90, 92 – 99, 101, 110, 113 – 116, 119, 121 – 129, 134, 135, 137 – 166];
2. Недостатня швидкодія гоніометричних вимірювальних систем [33, 35, 45, 47, 54, 57, 62, 69, 71, 75, 92, 93, 96 – 99, 101, 110, 113 – 116, 123, 125, 126, 128, 129, 137 – 140, 142, 143, 152, 155, 157, 160, 162].
3. Обмежені функціональні можливості [46 – 49, 57, 60, 63, 65, 80, 100, 113, 114, 116, 123 – 126, 138, 140, 142].

При вирішенні вказаних проблем можна умовно виділити два напрями підходів щодо підвищення точності та швидкодії кутових вимірювань (рис. 1.19), які не суперечать один одному.

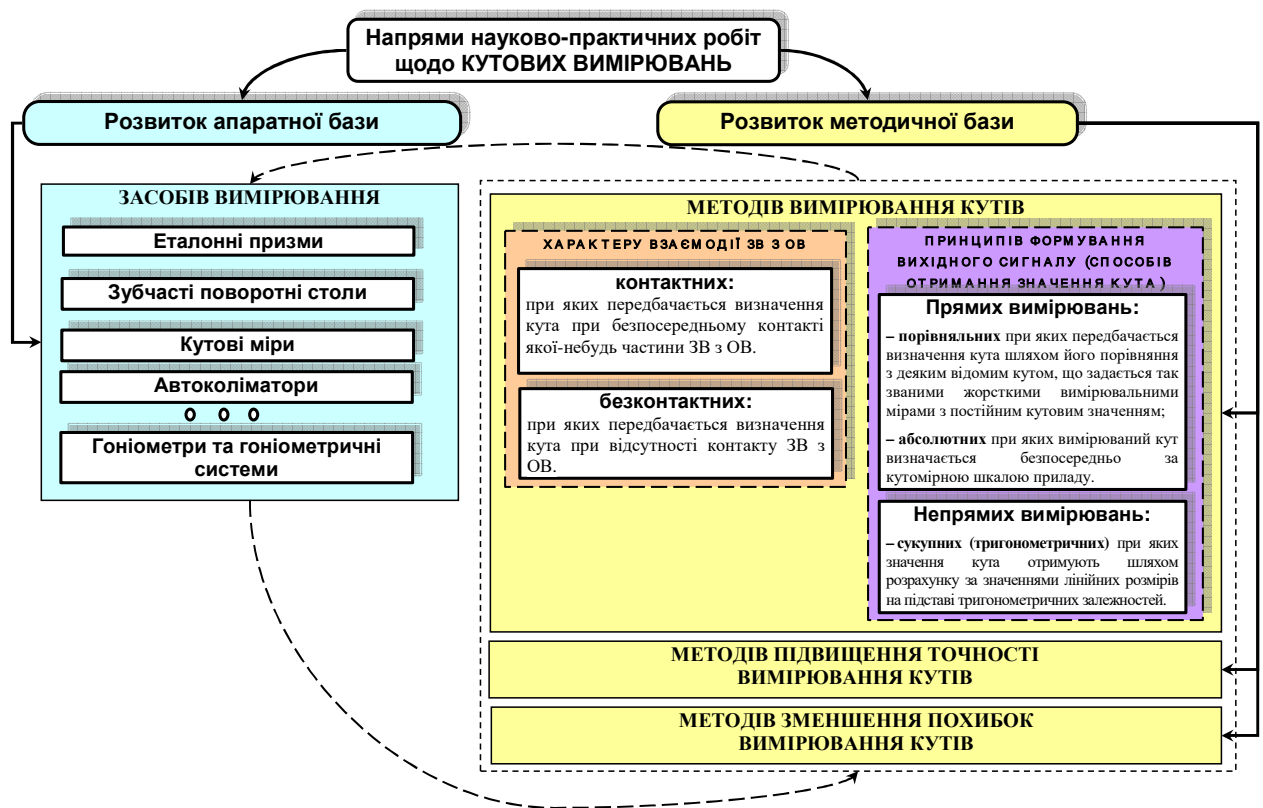


Рис. 1.19. Напрями науково-практичних досліджень в галузі кутових вимірювань

Перший напрям науково-практичних досліджень в галузі кутових вимірювань полягає у пріоритетному розвитку апаратної бази для проведення кутових вимірювань та зв'язаний з розробкою нових технічних засобів вимірювання (ЗВ), удосконаленням технологій вимірювання тощо. *Другий* – у розвитку методичної складової метрологічних процедур вимірювання та пов'язаний

з дослідженням метрологічних похибок, розробкою методів їх зменшення, у тому числі розвитку і методів планування та проведення експерименту, та ефективних методів обробки даних.

Сучасними науковцями та виробничниками накопичений цінний теоретичний та практичний досвід в галузі високоточних кутових вимірювань. Зокрема можна стверджувати, що на даний час, в області високоточних кутових вимірювань в цілому досягнуто значного прогресу. Це обумовлюється значними успіхами фундаментальних наукових досліджень, вдосконаленням технологій виготовлення типових елементів і вузлів гоніометрів та гоніометричних систем, розвитком нових та вдосконаленням відомих методів вимірювань та алгоритмів обробки вимірювальної інформації, широким використанням сучасної обчислювальної техніки.

Важливою тенденцією розвитку методів та засобів кутових вимірювань є прагнення до повної автоматизації, підвищення оперативності отримання та обробки вимірювальної інформації, а також її достовірності. Тому до сучасних кутовимірювальних засобів висувають вимоги щодо простоти конструкції та використання, універсальності, портативності, надійності при експлуатації, високої точності в достатньо великому діапазоні вимірювальних та / або контрольованих кутових величин, можливості уніфікації окремих вузлів та конструкцій в цілому, високої метрологічної достовірності отримуваних результатів, збільшення швидкодії, підвищення терміну використання приладів [6, 97].

Аналізуючи практичний та теоретичний досвід світових та вітчизняних науковців і виробників відомі на сьогодні *методи кутових вимірювань* умовно можна поділити наступним чином (див. рис. 1.19):

1. За характером взаємодії чутливого елемента ЗВ з об'єктом вимірювання:
 - контактні;
 - безконтактні;
2. За принципом формування вихідного сигналу тобто за способом отримання значення кута:
 - прямі: абсолютні та порівняльні;
 - непрямі: сукупні.

При цьому особливо цінним є практичний зарубіжний досвід науковців з приладобудування таких провідних країн як США, Німеччина, Великобританія та

ін. Інформація наведена в інформаційних джерелах [6, 101, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 115] дає можливість стверджувати про переважне практичне застосування безконтактних методів кутових вимірювань та відповідних засобів та систем реалізованих на їх основі. Зокрема сучасні безконтактні ЗВК умовно можна розділити на три групи: автоколіматори, теодоліти, гоніометри.

Автоколіматор – це оптико-електронний прилад, заснований на явищі автоколімації та використовуваний для точних вимірювань кутового положення дзеркала, закріпленого на контрольованому об'єкті. Автоколіматор може бути застосований для контролю прямолінійності і площинності напрямних (наприклад, верстата), відхилень від площинності; взаємного кутового розташування осей і площин виробів у просторі. Автоколіматор є одним з поширених і широко відомих високоточних ЗВК, що використовуються в різних областях машинобудування, приладобудування, геодезії та вимірювальної техніки (рис. 1.20).



Рис. 1.20. Автоколіматор: а) зовнішній вигляд моделі АКУ-0.5;

б) перевірка перпендикулярності направляючих у верстаті за допомогою автоколіматора

Сучасні цифрові та візуальні автоколіматори випускаються фірмами “Taylor Hobson” (Англія), “Logitech Inc.” (Шотландія), “Moeller-Wedel” (Німеччина), “Davidson Optronics” (США) та ін.

Основними недоліками автоколіматорів є порівняно невеликий діапазон кутових вимірів і неможливість їх використання для аналізу високочастотних складових кутового руху об'єкта через порівняно велику постійну часу приладу.

Теодоліт – ЗВК для вимірювання горизонтальних і вертикальних кутів. Використовується при топографічних, геодезичних та маркшейдерських зйомках, в будівництві тощо (рис. 1.21).

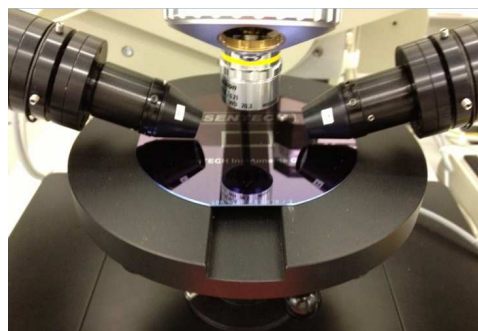


Рис. 1.21. Теодоліт 2Т30П

Гоніометри – (від грецької *gonia* – кут та *metron* – міра) прилади для наукового або практичного вимірювання кутів. Використовуються переважно для вимірювання кутів між плоскими полірованими гранями призми, кутів відхилення променів, що проходять через прозорі призми і клини, пірамідальності призми, визначення показника заломлення і дисперсії оптичних матеріалів (рис. 1.22)



а



б

Рис. 1.22. Гоніометр: а) ГС-5; б) моторизований гоніометр у складі спектроскопічного еліпсометру SE 800E виробництва SENTECH Instruments GmbH (Німеччина) для вирішення комплексу метрологічних задач дослідницького та виробничого характеру

Крім гоніометрів, що серійно випускаються як вітчизняною [116] так і зарубіжною промисловістю [105, 117, 108, 106, 107, 110, 6, 118, 119] існує ряд високоточних кутовимірювальних систем на їх основі, що використовуються в лабораторних [116] та виробничих умовах [6, 117] (див. табл. 1.3) та працюють автоматизованому та автоматичних режимах.

Гоніометри, що серійно випускаються як вітчизняною [116] так і зарубіжною промисловістю [105, 108, 117, 106, 107, 110, 6, 118, 119] та вимірювальні комплекси на їх основі, що складають сучасну базу кутовимірювальної техніки, та використовуються як в лабораторних так і

виробничих умовах приведені в табл. 1.3 з наведенням їх основних метрологічних параметрів.

Аналіз сучасного стану світового ринку гоніометричних систем, що представлений досить широко різноманітними за точністю, швидкістю та функціональними можливостями кутовимірювальними засобами та системами вказує на те, що сучасні гоніометричні системи розвиваються в двох напрямках. Це так звані «класичні» гоніометричні системи, які призначені для вимірювання кутів і використовуються в якості високоточних засобів вимірювання, і так звані «багатофункціональні» гоніометричні системи, які окрім вимірювання кутів застосовуються для виконання інших операцій, наприклад, в якості спектрометрів (рис. 1.23).

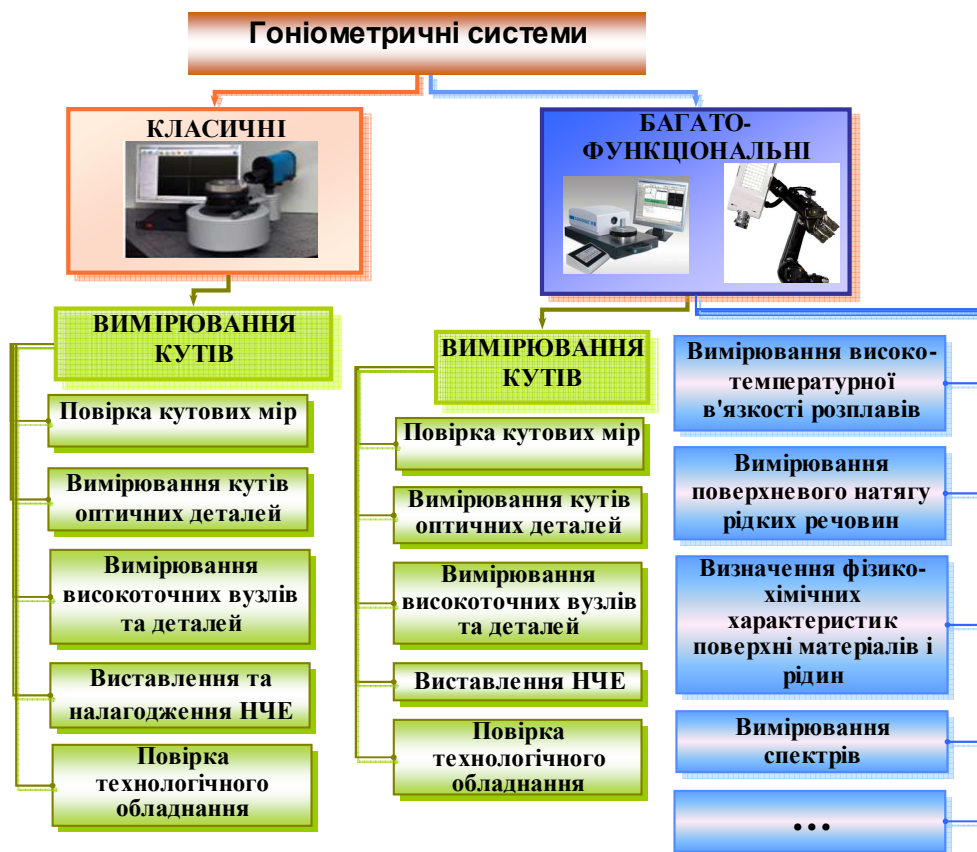





Рис. 1.23. Основні напрямки створення гоніометричних систем

Таблиця 1.3



Гоніометри та вимірювальні комплекси на їх основі, що складають сучасну базу кутовимірювальної техніки

Модель	Основні метрологічні параметри, переваги та недоліки	Призначення	Виробник
Гоніометри			
<p>Гоніометр-спектрометр ГС-2</p> 	<p>Ціна поділки шкали: 0,5"; Гранична похибка одноразового вимірювання: 2"; Діапазон вимірювання: 0 –360° Переваги: простота конструкції, відносно невисока вартість. Недоліки: порівняно невисока точність, відсутність автоматичного налаштування кутів, відсутність цифрової обробки вимірювальної інформації в режимі реального часу, неможливість використання у складі автоматизованих кутовимірювальних технологічних комплексів.</p>	<p>Вимірювання спектра кутів між нормаллями до плоских полірованих граней твердих прозорих і непрозорих тіл, пірамідальності їх граней, для вимірювання показника заломлення і дисперсії прозорих твердих тіл і для дослідження якості оптичних систем.</p>	<p>Україна КП СПБ “Арсенал”, м. Київ [116]; Російська Федерація.</p>

Продовження табл. 1.3

<p>Гоніометр ГС-5</p> 	<p>Ціна поділки шкали: 1" Гранична похибка одноразового вимірювання: 10" Переваги: простота конструкції, відносно невисока вартість. Недоліки: порівняно невисока точність, відсутність автоматичного налаштування кутів, відсутність цифрової обробки вимірювальної інформації в режимі реального часу, неможливість використання у складі автоматизованих кутовимірювальних технологічних комплексів.</p>	<p>Вимірювання кутів між нормальми до плоских полірованих граней твердих прозорих і непрозорих тіл та пірамідальності призм</p>	<p>Україна, КП СПБ "Арсенал", м. Київ, Російська Федерація.</p>
<p>Гоніометр Г5М</p> 	<p>Гранична похибка одноразового вимірювання: $\pm 5''$ Діапазон вимірювання горизонтальних кутів: 0..360° Ціна поділки шкали: 1" Переваги: простота конструкції, відносно невисока вартість. Недоліки: порівняно невисока точність, відсутність автоматичного налаштування кутів, відсутність цифрової обробки вимірювальної інформації в режимі реального часу, неможливість використання у складі автоматизованих кутовимірювальних технологічних комплексів.</p>	<p>Вимірювання кутів між нормальми до плоских полірованих граней твердих прозорих і непрозорих тіл, а також пірамідальності призм.</p>	<p>Україна, КП СПБ "Арсенал", м. Київ; Республіка Білорусь; Російська Федерація.</p>

Продовження табл. 1.3

<p>Дослідницький гоніометр BI-200SM [105]</p> 	<p>Крок автоматичної та ручної установки кутів: 0,01° Діапазон кутів розсіяння: 8° – 155° з кюветою 25мм і 15° – 155° з кюветою 12 мм. Точне підстроювання кута в ручному режимі: 0,01° Переваги: простота конструкції, відносно невисока вартість. Недоліки: неможливість точного підстроювання кутів в автоматичному режимі, відсутність цифрової обробки вимірювальної інформації в режимі реального часу, неможливість використання у складі автоматизованих кутовимірювальних технологічних комплексів.</p>	<p>Визначення характеристик світлорозсіювання на фіксованих або змінних кутах в діапазоні від 8° до 155° при визначенні молекулярної маси, обертального радіусу тощо при вивченні технології мікроемульсій, поведінки колоїдних систем, загальних характеристик рідин, полімеризації емульсій, зростання розмірів часток, процесів зародкоутворення.</p>	<p>США, компанія Brookhaven Instruments Corporation [105]</p>
<p>Автоматичний (динамічний) гоніометр лазерний ДГ-03Л, Динамічний гоніометр ДГ-03 [108]</p> 	<p>Діапазон вимірювання кутів 0..360° Гранична похибка одноразового вимірювання: $\pm 0,3''$ Переваги: висока точність, можливість автоматизованого вимірювання. Недоліки: висока вартість, складність конструкції, відсутність цифрової обробки вимірювальної інформації в режимі реального часу, вимагає доопрацювання для використання у складі автоматизованих кутовимірювальних технологічних комплексів.</p>	<p>Вимірювання в автоматизованому режимі кутів між нормальми до плоских відбиваючих поверхонь призматичних мір плоского кута, що мають коефіцієнт відбиття не менше 20%, калібрування кутових мір; калібрування перетворювачів кута; безконтактного вимірювання кутових переміщень об'єктів; вимірювання показника переломлення за способом найменшого відхилення промінця [108, 118].</p>	<p>Російська Федерація, Науково- виробничий комплекс "Діагностика" [108].</p>

Продовження табл. 1.3

<p>Гоніометр ДГ-1Л [108]</p> <p>Гоніометр ДГ-1Ф [108]</p> 	<p>Діапазон вимірювання кутів: 0..360°</p> <p>Гранична похибка одноразового вимірювання: ±0,2" (для ДГ-1Л) ±0,12" (для ДГ-1Ф)</p> <p>Переваги: висока точність, можливість автоматизованого вимірювання.</p> <p>Недоліки: висока вартість, складність конструкції, відсутність цифрової обробки вимірювальної інформації в режимі реального часу, вимагає доопрацювання для використання у складі автоматизованих кутовимірювальних технологічних комплексів.</p>	<p>Атестація різних кутових мір і калібрування перетворювачів кута в задачах калібрування різних кутових мір, різних перетворювачів кута; безконтактних вимірювань кутового руху об'єкта, показника заломлення за способом найменшого відхилення.</p>	<p>Російська Федерація, Науково-виробничий комплекс "Діагностика" [108]</p>
<p>Цифровий гоніометр СГ-1Ц; СГ-3Ц; СГ-5Ц / [108]</p> 	<p>Діапазон вимірювання кутів: 0 – 360°</p> <p>Гранична похибка одноразового вимірювання: СГ-1Ц ± 1,0" СГ-3Ц ± 3,0" СГ-5Ц ± 5,0"</p> <p>Ціна поділки шкали: 0,01"</p> <p>Переваги: можливість автоматизованого вимірювання, можливість використання у складі автоматизованих кутовимірювальних технологічних комплексів, можливість цифрової обробки інформації.</p> <p>Недоліки: висока вартість, складність конструкції, невисока точність, вимагає доопрацювання для автоматизованої обробки інформації в режимі реального часу.</p>	<p>Вимірювання у двох площинах кутів, утворених плоскими поверхнями твердого тіла. Повірка мір плоского кута, кутових клинів, багатограничних призм.</p>	<p>Російська Федерація, Науково-виробничий комплекс "Діагностика" [108]</p>


Продовження табл. 1.3

<p>Гоніометр статичний CG-1, GonioScan SG-1 [110]</p> 	<p>Гранична похибка одноразового вимірювання: $\pm 1,2''$ Переваги: висока точність, можливість автоматизованого вимірювання, можливість використання у складі автоматизованих кутовимірювальних технологічних комплексів, можливість цифрової обробки інформації. Недоліки: висока вартість, складність конструкції.</p>	<p>Вимірювання кутів оптичних деталей в автоматизованому режимі</p>	<p>Російська Федерація, ООО "ТНЕРТЕХ" [110].</p>
<p>Гоніометри PrismMaster®150; PrismMaster®300 [107]</p> 	<p>Гранична похибка одноразового вимірювання: $\pm 1,0''$ Переваги: простота конструкції, можливість автоматизованого вимірювання, автоматичного налаштування кутів, цифрова обробка інформації. Недоліки: порівняно невисока точність, висока вартість.</p>	<p>Вимірювання кутів призм, пірамідальної похибки, а також похибки нахилу грані призми до основи.</p>	<p>Німеччина, компанія Trioptics [107].</p>
<p>Комбінований Тензіометр-гоніометр (DCAT 11 / DCAT 11HR) [113]</p> 	<p>Діапазон вимірювання $0 \dots 180^\circ$ Гранична похибка одноразового вимірювання: $\pm 0,01^\circ$ Переваги: висока точність, можливість автоматизованого вимірювання, можливість використання у складі автоматизованих технологічних комплексів, можливість цифрової обробки інформації. Недоліки: висока вартість, складність конструкції.</p>	<p>Вимірювання в галузі хімії поверхні, при динамічних вимірюваннях поверхневого натягу і дослідження характеристик поверхні порошкоподібних і волокнистих матеріалів з метою контролю технологічних процесів хімічних виробництв і розробки нових промислових технологій</p>	<p>Німеччина, компанія DataPhysics Instruments GmbH [113]</p>


Продовження табл. 1.3

<p>Гоніометр-спектрометр Gonio II-VIS [115]</p> 	<p>Гранична похибка одноразового вимірювання: $\pm 0,6''$ Діапазон вимірювання кутів: $0^\circ \dots 360^\circ$. Переваги: висока точність, можливість автоматизованого вимірювання, можливість використання у складі автоматизованих технологічних комплексів, можливість цифрової обробки інформації. Недоліки: висока вартість, складність конструкції.</p>	<p>Вимірювання кутів між гранями твердих деталей, показника заломлення прозорих твердих матеріалів, кута пірамідальності.</p>	<p>Німеччина, компанія Moeller-Wedel [115].</p>
Гоніометричні комплекси / Goniometric complexes			
<p>Напівавтоматичний гоніометр з електронною оцінкою зображення GONIOMAT M5 GONIOMAT M10 [115]</p> 	<p>Діапазон вимірювання $0 \dots 360^\circ$; Гранична похибка одноразового вимірювання: $\pm 1,5''$ (для GONIOMAT M5) $\pm 2,5''$ (для GONIOMAT M10) Гранична похибка одноразового вимірювання: $\pm 2,5''$ для GONIOMAT M5) $\pm 5,0''$ (для GONIOMAT M10) Переваги: можливість використання у складі автоматизованих технологічних комплексів Недоліки: висока вартість, порівняно невисока точність.</p>	<p>Вимірювання кутів та тестування багатограничних оптичних призм, клиновидних пластин та кутових датчиків в лабораторних та виробничих умовах. Зокрема вимірювання кутів призм, мікропризм; вимірювання кутів клинів; визначення кутових відхилень, визначення пірамідальності тощо.</p>	<p>Німеччина, компанія Moeller-Wedel [115].</p>

Продовження табл. 1.3

<p>Автоматичний гоніометр GONIOMAT A / A-HR GONIOMAT A-HR [115]</p>  <p>GONIOMAT A5 [115]</p> 	<p>Діапазон вимірювання 0... 360°; Гранична похибка одноразового вимірювання: ±0,7" (для GONIOMAT A / A- HR) ±0,4" (для GONIOMAT A-HR-S) ±1,5" (для GONIOMAT A5) Гранична похибка одноразового вимірювання: ±1,5" (для GONIOMAT A / A- HR) ±0,6" (для GONIOMAT A-HR-S) ±2,5" (для GONIOMAT A5) Переваги: висока точність, автоматичне вимірювання з цифровою обробкою інформації, можливість використання у складі автоматизованих вимірювальних технологічних комплексів. Недоліки: висока вартість.</p>	<p>Вимірювання кутів та тестування багатогранних оптичних призм, клиновидних пластин та кутових датчиків в лабораторних та виробничих умовах.</p>	<p>Німеччина, компанія Moeller-Wedel [115].</p>
---	---	---	---

Продовження табл. 1.3

<p>Кутовимірювальна система ГС1Л [120]</p>	<p>Гранична похибка одноразового вимірювання: $\pm 0,5''$</p>	<p>Вимірювання в автоматичному режимі кутів між плоскими полірованими гранями твердих тіл, пірамідальності граней призм, показника заломлення скла.</p>	<p>Україна, КП СПБ “Арсенал”, м. Київ [120].</p>
	<p>Переваги: висока точність, автоматичне вимірювання з цифровою обробкою інформації, можливість використання у складі автоматизованих вимірювальних технологічних комплексів.</p> <p>Недоліки: відсутність інтеграції з сучасними обчислювальними системами, вимагає доопрацювання та модернізації для використання у сучасних вимірювальних технологічних комплексах та інформаційних системах, порівняно низька надійність.</p>		
<p>ДЕТУ 01-05-10 [70]</p>	<p>Номинальне значення або діапазон значень одиниці вимірювань, яку відтворює або зберігає еталон ($0 - 360^\circ$); Середній квадратичний відхил результату вимірювань не перевищує $0,04''$; Невилучена систематична похибка не перевищує $0,5''$.</p> <p>Переваги: висока точність.</p>	<p>Державний первинний еталон одиниці площинного кута</p>	<p>Україна, ДП „Укрметр-тестстандарт” [70].</p>

Продовження табл. 1.3

<p>Лазерний інтерферометр XL-80 [6]</p> 	<p>Діапазон вимірювання кутів $\pm 10^\circ$; Гранична похибка одноразового вимірювання : $\pm 0,6\%$ $\pm 0,5 \pm 0,1$ мкм/м Роздільна здатність 0,1 мкм/м</p> <p>Примітка: М – переміщення вздовж осі вимірювання, м; % – відсоток від обчислювального кута</p> <p>Переваги: висока точність, автоматизоване вимірювання, можливість використання у складі автоматизованих вимірювальних технологічних комплексів.</p> <p>Недоліки: висока вартість</p>	<p>Кутові та лінійні вимірювання позиціонування координатних осей металообробних верстатів, кутові вимірювання відхилення координатної осі від прямолінійності, прямолінійності, перпендикулярності, площинності оброблюваної поверхні, кутового позиціонування поворотної осі / столу.</p>	<p>Великобританія компанія Renishaw [6].</p>
<p>Багатофункціональний гоніометр Robogonio</p> 	<p>Гранична похибка $\approx 0,12''$;</p> <p>Переваги: висока точність, автоматизоване вимірювання, цифрова обробка інформації, розширені функціональні можливості, швидкодія</p> <p>Недоліки: висока вартість ($\geq 200\,000$ грн.)</p>	<p>Багатофункціональний прилад для 6-осьових вимірювань фото- і радіометричних параметрів з кутовою залежністю, об'єднує переваги стандартних гоніометрів різних типів. Велике число ступенів свободи, можливість маніпулювати приладом при вимірах під різними кутами. Сканування об'єкти різної форми в трьох площинах за допомогою однієї вимірювальної системи.</p>	<p>США, компанія Opsira</p>

Аналіз сучасного стану світового ринку гоніометричних систем вказує на те, що темпи виробництва саме багатофункціональних гоніометричних систем на сьогоднішній день є досить потужними (рис. 1.24).

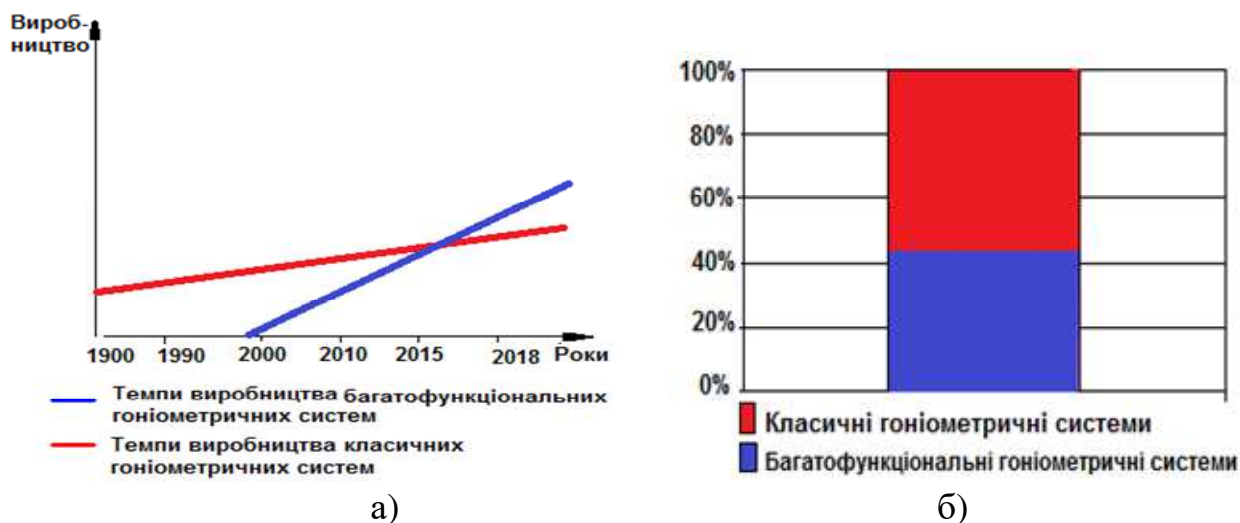


Рис. 1.24. Сучасний стан світового виробництва гоніометричних систем: а) темпи виробництва різних типів гоніометричних систем, б) співвідношення між різними типами гоніометричних систем на світовому ринку

Таким чином можна стверджувати, що сучасна база кутовимірювальних засобів і систем представлена достатньо широко як «класичними» так і «багатофункціональними» гоніометричними системами. Основними перевагами останніх є висока точність, автоматизована обробка інформації, швидкодія і розширені функціональні можливості, але висока вартість робить ускладнює їх використання в межах України.

1.3.2. Гоніометри як основна складова сучасної прецизійної кутовимірювальної техніки

На сьогодні, за твердженням багатьох вітчизняних та зарубіжних науковців, найбільш точними оптичними приладами для безконтактного вимірювання кутів є гоніометри [5, 94, 101, 102, 104]. При цьому на основі приведенного в підрозділі 1.3. можна стверджувати, що сучасна світова база гоніометрів на сьогодні представлена такими моделями, які працюють на основі лазерів і дозволяють проводити високоточні вимірювання та обробку вимірювальної інформації в автоматизованому та автоматичному режимах. Крім гоніометрів, що серійно

випускаються вітчизняною [116, 70] та зарубіжною промисловістю [6, 105, 107, 108, 110, 113, 115, 118] також існує досвід створення високоточних кутовимірювальних систем на їх основі, що використовуються в лабораторних [120, 70] та виробничих умовах [6, 113].

Традиційно *гоніометр* являє собою оптико-механічний прилад, призначений для вимірювання кутів між плоскими полірованими гранями призм, кутів відхилення променів, що проходять через прозорі призми і клини, пірамідальності призм, визначення показника заломлення і дисперсії оптичних матеріалів. Вимірювання кутів за допомогою гоніометрів такого типу здійснюється в горизонтальній площині абсолютним методом шляхом порівняння кутів з точно градуйованим лімбом.

Основними вузлами так званого *традиційного*, або як його іще називають *візуального гоніометра* (рис. 1.25, а) є лімб (кругова шкала з градуванням від 0° до 360°) (рис. 1.25, б) з осьовою системою, предметний столик, на якому встановлюється контрольована деталь, дві труби, одна з яких є коліматором, а друга зоровою, відлікова система і основа.

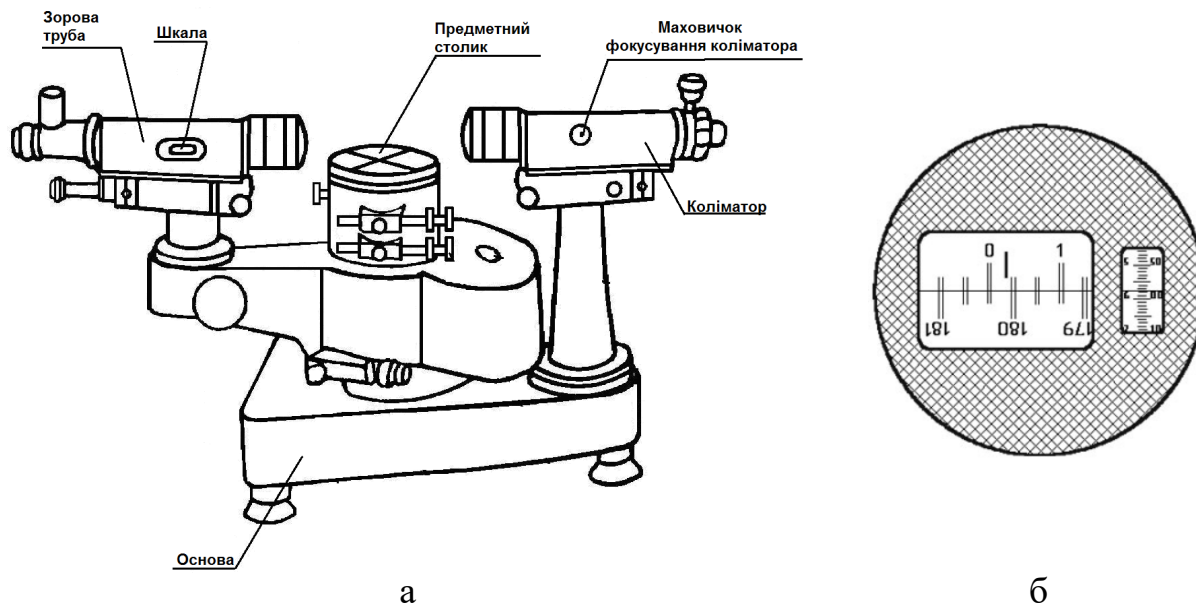


Рис. 1.25. Схема гоніометра ГС-5: а) загальний вигляд; б) поле зору відлікового мікроскопа

Коліматор і зорова труба утворюють оптичну систему або оптичний пристрій гоніометра, що необхідний для отримання пучків паралельних променів. Паралельний пучок променів, що виходить із коліматора, задає в просторі деякий

базовий напрямок, відносно якого відраховуються вимірювані кути. Зорова труба служить для фіксації в просторі напрямку, що збігається з оптичною віссю труби. Найпростіша зорова труба Кеплера, складається з об'єктиву, окуляра, сітки з перехрестям. Об'єктив – це звернена до ОВ частина оптичної системи, що формує дійсне зображення ОВ. Окуляр – це звернена до ока спостерігача частина оптичної системи, яка служить для візуального розгляду дійсного зображення, сформованого об'єктивом [5].

Відлікова система гоніометра складається з освітлювальної та проекційних систем. Проекційна система забезпечена оптичним мікрометром і проектує штрихи ділянки лімба на його діаметрально протилежну ділянку, а звідти – в кутове поле відлікового мікроскопа, куди проектується також шкала мікрометра. Зорова труба і коліматор мають однакові телеоб'єктиви та являють собою телескопічні системи з внутрішнім фокусуванням.

У фокальній площині коліматора встановлена регульована щілина (марка), що освітлюється джерелом випромінювання. Зорова труба забезпечена знімним автоколімаційним окуляром і може повертатися навколо столика разом з відліковою системою гоніометра. Предметний столик може обертатися як самостійно так і разом з лімбом.

Кути на гоніометрі вимірюють колімаційним і автоколімаційним методами. Загалом принцип вимірювання на гоніометрі полягає в тому, що при збігу оптичної осі автоколіматора і відбитого зображення автоколімаційної марки від грані контрольованої деталі виконується послідовна фіксація положення плоских поверхонь вимірюваного кута з відліком їх положення по відліковому пристрою гоніометра.

Зокрема при колімаційному методі вимірювання столик з призмою повертають так, щоб паралельний пучок променів від коліматора, відбившись від однієї з граней призми, потрапив в зорову трубу. Зображення щілини коліматора суміщають з перехрестям зорової труби і виконують перший відлік по лімбу гоніометра. Потім лімб зі столиком повертають так, щоб поєднати зображення щілини коліматора з перехрестям зорової труби після відбиття пучка променів від іншої грані призми, і виконують другий відлік по лімбу. Вимірюваний кут визначається як різниця двох відліків.

При автоколімаційному методі вимірювання кутів використовують тільки зорову трубу, на яку встановлюють автоколімаційний окуляр. При використанні автоколімаційного окуляра зорової труби роблять установку грані деталі перпендикулярно до осі зорової труби, при такому положенні відбитий промінь повертається по осі труби (коліматор в цьому випадку не використовується). Столик з призмою повертають так, щоб зображення щілини після відбиття променів співпало з перехрестям сітки окуляра, і виконують перший відлік по лімбу гоніометра. Аналогічним чином знімають другий відлік по лімбу при наведенні автоколіматора на другу грань призми. Послідовно наводячи трубу на різні грані ОВ, визначають кути взаємного повороту деталі і зорової труби по відліковій системі приладу [5]. Вимірюваний кут, визначають як і при колімаційному методі вимірювання – різницею двох відліків. Загалом сутність автоколімації полягає в об'єднанні в одному приладі коліматора і зорової труби. Автоколіматори використовуються для того, щоб з високою точністю встановлювати плоскі відображаючі поверхні перпендикулярно його оптичній осі. Він являє собою зорову трубу зі спеціальним окуляром, який називається автоколімаційним.

Похибка вимірювання так званим традиційним або візуальними гоніометром дуже мала і становить одиниці кутових секунд. Зокрема відомі моделі таких гоніометрів ГС-5, Г5М, ГС-2 виробництва КП СПБ “Арсенал””, м. Київ Україна [116] дозволяють проводити вимірювання з похибкою 5" та 2" відповідно. Цифри в умовному позначенні моделі гоніометра характеризують його похибку.

Недоліками цих гоніометрів є порівняно великі габаритні розміри, значна тривалість вимірювань, обумовлена статичним характером процедури вимірювань, а також велика ймовірність наявності суб'єктивних похибок оператора.

Крім візуальних гоніометрів широке застосування знайшли сучасні *цифрові гоніометри*, основною відмінністю яких є використання в якості лімба прецизійних цифрових перетворювачів кута (ЦПК), робота яких основана на різних фізичних явищах, наприклад, фотоелектричні перетворювачі кута, лазерні перетворювачі кута тощо (див. підрозділ 1.5). Точність вимірювання цифровими гоніометрами вища, а похибка відповідно менша і становить від 0,1" до 5,0" при

вимірюванні в один прийом та від 0,08" до 2,5" при багаторазовому вимірювання кута у всьому діапазоні в залежності від конкретної моделі (див. табл. 1.3).

Окрім візуальних та цифрових гоніометрів, що випускаються серійно існують інші кутовимірювальні установки на основі гоніометрів, наприклад, відома кутовимірювальна система ГС1Л [120] (див. табл. 1.3), або авіаційний автоматичний радіокомпас АРК-15М [111].

Сучасні *гоніометри* – це група оптико-електронних вимірювальних приладів, які являють собою сучасні високоточні вимірювальні засоби виробничого та лабораторного типу. Так, наприклад, Білоруський національний еталон плоского кута, який відтворює значення плоских кутів у градусах з систематичною складовою похибки відтворення 0,11" та випадковою складовою похибки відтворення одиниці плоского кута 0,03" являє собою комплекс вимірювальної апаратури (рис. 1.26), що містить у своєму складі гоніометр ГС-1Л з кільцевим лазером [102].



Рис. 1.26. Білоруський національний еталон плоского кута [102]

Сьогодні гоніометри – це комплекси вимірювальної апаратури, що поєднують кращі сучасні досягнення мікропроцесорної та обчислювальної техніки, техніки лазерів з унікальними за технологією виготовлення оптичними приладами. Вони призначені для вимірювання кутів між плоскими гранями, що добре відображають світлові промені. Області застосування гоніометрів надзвичайно різноманітні. Так їх застосовують в машино- та приладобудуванні, оптико-механічній промисловості, навігації, наукових дослідженнях, випробувальних, повірочних та калібрувальних лабораторіях, а також метрологічних центрах [5, 94, 104, 102,].

У машинобудуванні гоніометри застосовуються, наприклад, для перевірки ділильних головок [5], визначення відхилення від прямолінійності кутів

позиціонування верстатів та похибки вимірювання координатно-вимірювальних машин [6], а також для контролю кутів оброблених деталей (рис. 1.27).



Рис. 1.27 Повірка токарного верстату [6]

В оптико-механічній промисловості їх застосовують в основному при виробництві та вимірюванні оптичних деталей (призм), кристалів тощо [102, 104] (рис. 1.28).



Рис. 1.28. Гоніометр-спектрометра ГС-2, на якому перевіряють рефрактометричні пластини і призми, використовувані для перевірки рефрактометрів

Одним з важливих застосувань гоніометрів є навігаційні прилади, використовувані в системах керування об'єктами різного призначення. У цих пристроях гоніометри застосовуються для визначення кутів, зокрема, між гіроскопічним блоком і корпусом об'єкта. За отриманим від перетворювачів значенням кутів та іншій інформації обчислюють впливи на об'єкт керування, наприклад, літальний апарат. Яскравим прикладом використання гоніометрів у навігаційних приладах може виступати авіаційний автоматичний радіокомпас АРК-15М, що призначений для літаководіння по приводним і широкомовним радіостанціям і радіомаякам [111]. Спрощена структурна схема АРК-15М приведена на рис. 1.29.

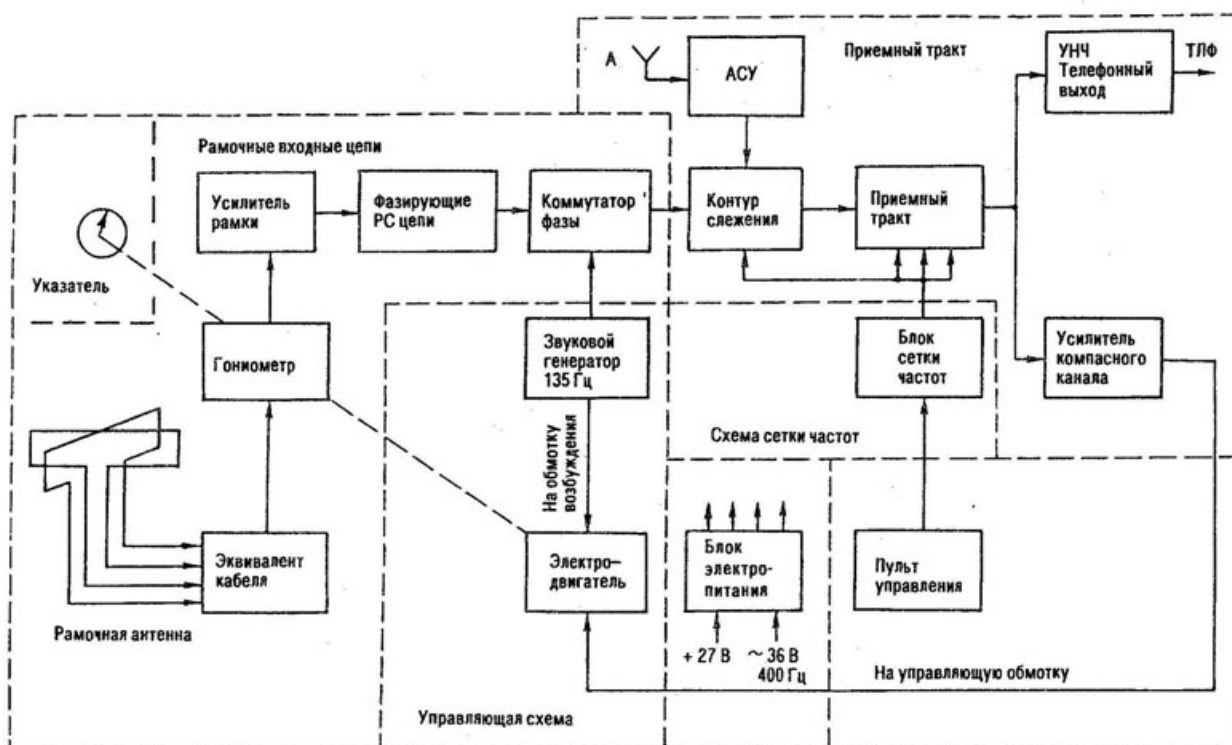


Рис. 1.29. Спрощена структурна схема АРК-15М

В наукових дослідженнях гоніометр, наприклад, може бути застосовуваний для вимірювання кута колінного, стегнового або ліктьового суглобів під час різноманітних рухів людини [121] (рис. 1.30). Також відома низка статей, в яких приводиться досвід застосування гоніометрів в медичних цілях. Зокрема в [122] приведено результати дослідження мінливості сили реакції на землю та кінематики з обох боків під час прогулянки пацієнта в 3-х точкових часткових вагових носіях при ураженнях ніжної кінцівки. Для кутових вимірювань автори застосовують гоніометр. В [123] автори приводять опис автоматизованої системи, яка вимірює кутові швидкості милиці. За допомогою експерименту авторами підтверджено, що розроблена система може оцінювати та візуалізувати рух милиці, з використанням внутрішніх гоніометричних датчиків, вбудованих в неї. В публікації [124] досліджується розподіл тиску на передпліччя під час розтягування колійних ліктів без використання милиці та з її використанням. В системі використовується гоніометр. В роботі [125] проаналізовано сучасні конструкції милиць для передпліччя, та за допомогою гоніометричної вимірювальної системи доведено, що вони не призначені для довгострокового використання, а надмірне їх використання часто призводить до формування гематом та виникнення болю у передпліччі. В зв'язку цим автори роботи сформулювали гіпотезу, що найбільший тиск між

передпліччям та милицею під час ходьби виникає в області ліктя, при цьому рівень ваги передпліччя та кінематичні параметри руху впливають на пікові значення тиску та його розподіл.



Рис. 1.30. Вимірювання амплітуди рухів в ліктьовому суглобі за допомогою гоніометра

1.3.3. Перетворювачі кута

Для реалізації кутових вимірювань в автоматичному та автоматизованому режимах широко використовуються відповідні цифрові перетворювачі кута (ЦПК). ЦПК – це пристрій, призначений для перетворення величини кута в електричні сигнали, що дозволяють визначити його значення. Поділяються на інкрементні і абсолютні, які можуть мати дуже високу роздільну здатність.

В *абсолютному* датчику кута кутове положення ротора визначається в довільний момент часу. Інформація про кутове положення закладена в коді, сформованому, як правило, в процесі зчитування інформації з n доріжок вимірювальної шкали. Число міток, нанесених на n -ну доріжку, становить 2^n , в результаті чого кут повороту ротора ЦПК щодо нульової мітки зчитується зі шкали у вигляді двійкового коду.

Інкрементні перетворювачі мають всього одну доріжку з мітками, розташованими еквідистантно по куту, в результаті чого визначення кутового положення ротора перетворювача можливо тільки в процесі підсумовування імпульсів вихідного сигналу. Зчитування інформації в інкрементних перетворювачах засновано на ефекті Муару. У класичного інкрементного ЦПК скляний диск (растр) градуйований як правило на 18000 – 36000

радіально розташованих ліній. Інкрементні ЦПК як правило, характеризуються вищою точністю, наприклад, інкрементний ЦПУ німецької фірми Heidenhain RON 905 має похибку меншу 0,5". Сучасні цифрові гоніометри, наприклад, фірм Moeller-Wedel, Taylor-Hobson та ін. побудовані на основі інкрементних ЦПК.

В основу роботи ЦПК покладено різні фізичні принципи. Так відомими є електростатичні, електродинамічні, ультразвукові, мікрохвильові, ємнісні, фотоелектричні, оптичні, лазерні [6, 109] та ін.

Одним з різновидів електродинамічних перетворювачів, що використовується для безконтактного вимірювання кутових переміщень є індуктивний датчик — *індуктосин*TM (термін офіційно зареєстрований фірмою Farrand Control, Inc.) [109], принцип дії якого полягає у використанні принципу електромагнітної індукції. Індуктосин являє собою плоску електричну машину, основними елементами якої є два ізоляційних диска з нанесеними на них друкованими обмотками (рис. 1.31); диски розташовані на різних осях співвісно і паралельно і можуть повертатися один (ротор) відносно другого (статора).

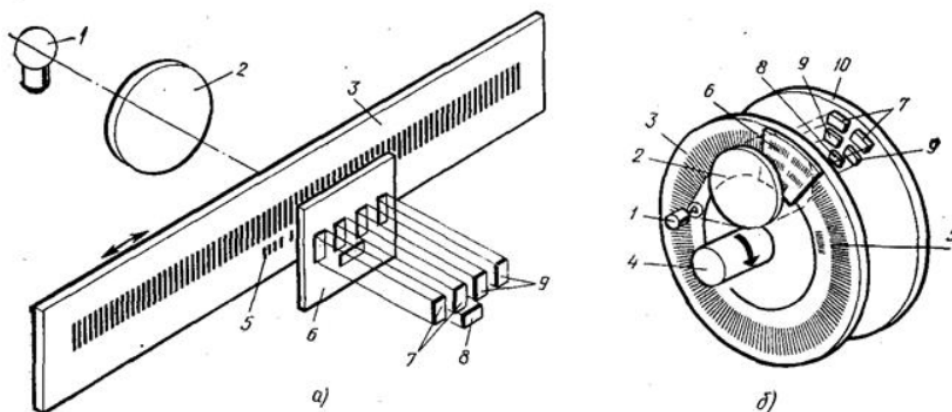


Рис. 1.31. Індуктивні датчики: а) лінійний, б) круглий: 1 – освітлювач, 2 – лінза, 3 – шкала, 4 – вал, 5 – риску нуль-мітки, 6 – з’ємник, 7 – фотодіоди, 8 – фотодіоди нуль-мітки, 9 – фотодіоди, 10 – корпус

Магнітопроводу індуктосин не має, в його якості виступає повітряний проміжок між двома дисками. Відстань між дисками становить десяті частки міліметра. Обмотка одного з дисків, наприклад, поворотного ротора живиться змінним струмом, на виході обмотки другого диска (статора) одержують напругу, параметри якої є функцією кутового положення дисків. Основними

джерелами похибок індуктосинів є неточність виконання обмоток по куту, не площинність струмопровідних шарів ротора і статора і радіальні ексцентриситети обмоток, викликані розбіжністю геометричних осей обертання обмоток з реальною віссю обертання. Сумарна похибка вимірювання кутів за допомогою індуктосинів становить 3-10". Перевагами індуктосину є порівняно проста конструкція.

Сучасні тенденції розвитку вимірювальної техніки призвели останнім часом до виробництва цифрових вимірювальних приладів на основі *фотоелектричних* перетворювачів кута [97]. Фотоелектричні перетворювачі кута мають більш високу точність кутових вимірювань при суттєво менших масо габаритних показниках в порівнянні з іншими типами цифрових перетворювачів кута. У таких приладах на прозорому лімбі наносять кодову маску у вигляді концентричних окружностей (доріжок) з прозорими і непрозорими ділянками, кількість яких збільшується зі збільшенням діаметра окружності. Освітлювач і фотоприймачі розташовані нерухомо по обох сторонах кодового лімба відповідно проти кожної з доріжок. При обертанні кодового лімба змінюються сигнали фотоприймачів, на виході яких одержують кодові комбінації, що відповідають куту повороту лімба (рис. 1.32).

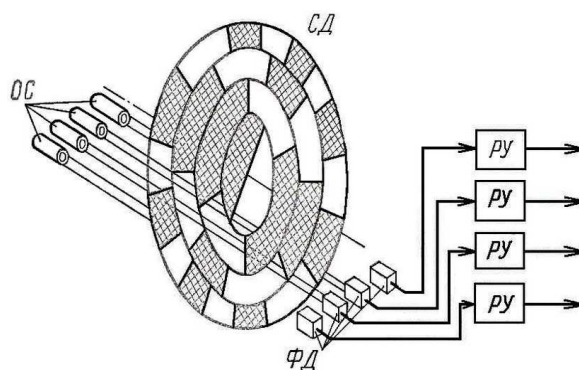


Рис. 1.32. Фотоелектричний перетворювач кута

Для підвищення точності використовують муарові смуги, що виникають при сполученні, наприклад, двох фігур визначеної конфігурації. Одним з найбільш точних на даний час є фотоелектричний перетворювач кута АГК-5, середньоквадратична похибка якого становить 1,5".

Одним з перспективних ЗВК є *частотний* перетворювач кута на основі квантових магнітометрів [126]. Такі перетворювачі мають високу чутливість і

швидкодію, однак мають обмеження щодо діапазону вимірюваних кутів, чутливі до зовнішніх магнітних полів.

Також засобами безконтактних прецизійних кутових вимірювань, що дозволяють ефективно вирішувати вищевказані задачі є *лазерні* кутові (гоніометричні) вимірювальні системи, що використовують фундаментальні властивості лазерів (кільцевих, напівпровідникових). За останні кілька десятиліть для вирішення багатьох практичних завдань було створено ряд конструкцій напівпровідникових лазерів: з резонатором Фабрі-Перо, з розподіленим зворотнім зв'язком, з розподіленими брегівськими дзеркалами, із зовнішніми гібридними дзеркалами, з волоконно-брегівською решіткою, з вертикальним резонатором (ZCSEL). Так особлива увага приділяється датчикам обертання на базі напівпровідникових лазерів [127] та кільцевих лазерів (КЛ) [94, 95, 96]. Сьогодні існує кілька різновидів датчиків обертання, це датчики на основі ефекту Сан'яка, такі як, газові КЛ і волоконно-оптичні гіроскопи [127]. При побудові кутових вимірювальних систем найчастіше використовують принцип комплексування двох перетворювачів кута – КЛ та оптичного датчика кута (рис. 1.33).

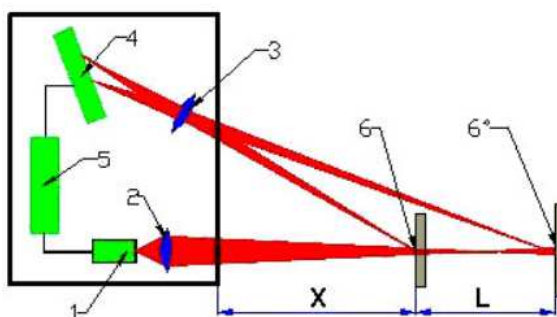


Рис. 1.33. Структурна схема оптичного датчика: 1 – напівпровідниковий лазер, 2, 3 – об'єктиви, 4 – CCD-лінійка, 5 – процесор сигналів, 6, 6'' – вимірювані об'єкти

Проте при вимірюванні кутів за допомогою перетворювачів на основі лазерів виникають похибки які проявляються при нестабільності швидкості обертання КЛ, а також обумовлюються впливом зовнішніх магнітних полів і в першу чергу магнітного поля Землі [128]. На основі КЛ створено цілий ряд гоніометричних установок, точність яких складає близько 0.05". Перший лазерний динамічний гоніометр (ЛДГ) був реалізований у 70-ті роки минулого століття у

Всеросійському науково-дослідному інституті метрології (ВНІМ) імені Д. І. Менделєєва ВНІМ (РФ, м. Санкт-Петербург) для передачі в динаміці розміру одиниці плоского кута від зразкової багатогранної призми магнітному перетворювачу кута. Перший комерційний лазерний гоніометр ГС-1Л з похибкою близько $0,5''$ був випущений казенним підприємством спеціального приладобудування (КП СПБ) “Арсенал” (Україна, м. Київ) на початку 70-их рр. минулого століття після спільних робіт з Санкт-Петербурзьким державним електротехнічним університетом “ЛЕТІ”. Ця система використовується в теперішній час в якості еталона кута в Метрологічному інституті Словаччини (м. Братислава) [99]. Також на основі лазера фірмою RENISHAW (Великобританія) розроблені та впроваджені у виробництво лазерні інтерферометри (наприклад, система лазерного інтерферометра XL-80) та автоматизовані системи Ballbar (наприклад, система QC10 ballbar) для перевірки технічного стану та калібрування верстатів та координатно-вимірювальних машин з метою забезпечення жорстких вимог до точності виготовлення деталей у відповідності до міжнародних стандартів якості. Вказані вимірювальні системи Renishaw, що використовуються для виконання прецизійних лінійних та кутових вимірювань відповідно до різноманітних міжнародних стандартів при перевірці технічного стану обладнання, прийняті у світі в якості галузевого стандарту з контролю експлуатаційних характеристик обладнання [6]. Всі кутові та лінійні вимірювальні системи Renishaw мають інтерферометричну природу, тобто вимірювання виконуються за допомогою лазера [6].

1.4. Постановка наукової проблеми, мета та задачі роботи

Проблема кутових вимірювань є важливою та актуальною для багатьох галузей: приладо- та машинобудування, навігації, орієнтації, металургії, радіолокації, астрономії. При цьому перелік цих галузей постійно розширюється. Це обумовлюється тим, що сучасний світовий промисловий ринок та міжнародні стандарти висувають високі вимоги до якості продукції, що виготовляється, яка забезпечується різними технічними засобами і в тому числі приладовими системами вимірювання кутів.

Особливо гостро стоїть питання підвищення точності та швидкодії, що досягається за рахунок розробки нових та вдосконалення існуючих гоніометричних систем.

Аналіз сучасного стану світового ринку гоніометричних систем дозволяє стверджувати факт розвитку гоніометричних систем в двох напрямках. Це так звані “класичні” гоніометричні системи, які призначені для вимірювання кутів і використовуються в якості високоточних засобів вимірювання, і так звані “багатофункціональні” гоніометричні системи, які крім вимірювання кутів застосовуються для виконання інших операцій, наприклад, в якості спектрометрів. Причому темпи виробництва останніх на сьогоднішній день є досить потужними.

Сучасна база кутовимірювальних засобів і систем представлена достатньо широко як “класичними” так і “багатофункціональними” гоніометричними системами, які на сьогоднішній день являють собою складні програмно-технічні комплекси. Основними перевагами останніх є висока точність, автоматизована обробка інформації, швидкодія і розширені функціональні можливості, але висока вартість ускладнює їх використання в межах України.

Варто зазначити, що при вимірюванні високоточних об’єктів, наприклад, багатогранних призм, які використовуються у прецизійному приладо- та машинобудуванні в якості еталонних та робочих засобів вимірювання кутів, в Україні та ін. державах таких як Чехія, Словаччина, Білорусь використовувалась вітчизняна кутовимірювальна система ГС1Л, що є розробкою КП СПБ “Арсенал” за активною участю кафедри приладобудування НТУУ “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”. Проте на сьогодні похибки гоніометричних систем найкращих світових зразків є меншими за похибку ГС1Л і не перевищують 0,1". Це призвело до того, що Чехія, Словаччина та Білорусь у 2018 р. відмовились від застосування ГС1Л в якості еталону кута. Тому можна констатувати, що в Україні дослідження в галузі високоточних вимірювань кутів проводяться на недостатньому рівні. В результаті для України проблема забезпечення високоточного вимірювання кутів за рахунок власних досягнень науки та техніки залишається досить гострою та невирішеною.

З врахуванням вказаного автор вбачає **наукову проблему** підвищення точності та швидкодії гоніометричних вимірювань.

Вказане може бути досягнуто за рахунок розробки та впровадження прецизійної приладової системи вимірювання кутів (ППСВК), за рахунок використання фізичних явищ лазерної спектроскопії, фізичних принципів роботи напівпровідникових фоточутливих елементів, нейромережових технологій, теорії ймовірності та математичної статистики, методів системного підходу, теорії множин, дискретної математик та обчислювальної математики, а також комп'ютерного моделювання.

Таким чином, *метою* дисертаційної роботи є підвищення точності та швидкодії гоніометричних вимірювань.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні *завдання*:

1. Провести аналіз існуючих приладових систем вимірювання кутів та систематизувати відомі підходи щодо підвищення точності та швидкодії для використання отриманих результатів при побудові ППСВК;

2. Запропонувати сукупність принципів для побудови ППСВК з підвищеною точністю та швидкістю;

3. Оновити математичну модель похибки ППСВК, яка системно враховує особливості її складових для подальшого використання при корекції результатів вимірювання;

4. Розробити підхід до визначення необхідної кількості спостережень при багаторазових вимірюваннях, що корелює із заданою точністю та використовується при нормуванні випадкових складових похибок вимірювання кутів;

5. Розробити штучні нейронні мережі (ШНМ) для функціонування ППСВК з огляду необхідності автоматичного аналізу інформації та її обробки для підвищення точності та швидкодії вимірювання кутів;

6. Розвинути метод ковзного середнього щодо фільтрації вихідного сигналу ППСВК для зменшення флуктуацій та підвищення точності вимірювання;

7. Розробити алгоритмічне та програмне забезпечення, що реалізує автоматизоване функціонування ППСВК, та рекомендації щодо його практичного використання;

8. Впровадити результати роботи у виробництво та у навчальний процес Житомирського державного технологічного університету.

Висновки до розділу 1

1. Проведено аналіз задачі вимірювання величини плоского кута, зокрема, при попередній виставці НЧЕ. Встановлено, що найбільшій точності виставки дозволяє досягти спосіб кутового узгодження із застосуванням методу виставки з плоским розворотом.

2. Проаналізовано причини, що призводять до появи помилок попередньої виставки НЧЕ. Визначено, що ці помилки обумовлюються не ортогональністю осей вимірювальних елементів НЧЕ та їх обмеженою чутливістю.

3. Проаналізовано фактори, що впливають на появу похибок вимірювання величини плоского кута при попередній виставці НЧЕ. На підставі аналізу визначено, що похибки попередньої виставки НЧЕ задаються похибками вимірювальних засобів, що використовуються для калібрування та попередньої виставки НЧЕ, похибками вимірювання значень кута та рухом об'єкту.

4. Проаналізовано методи опису рухів НЧЕ при їх попередній виставці. На підставі цього встановлено, що найбільш досконалим методом, порівняно з іншими методами опису рухів НЧЕ, при їх попередній виставці, можна вважати метод із застосуванням математичного апарату кватерніонів. Це обумовлюється можливістю виконання порівняно невеликої множини математичних операцій при його застосуванні і відповідно призводить до зменшення витрат часу та підвищення продуктивності виконуваних робіт. При цьому визначено, що точність виставки в цілому буде мало залежати від методу опису рухів НЧЕ при їх попередній виставці за умови проведення одноразових спостережень. Навпаки, при багаторазових спостереженнях обраний метод буде мати вплив на результат вимірювання. Це пов'язано з тим, що на результат вимірювання впливають похибки округлення результатів обчислень, які будуть накопичуватись при багаторазових спостереженнях.

5. Проведено аналіз впливу засобів вимірювання та методів проведення вимірювання, а також дій оператора на точність виставки НЧЕ. На підставі цього встановлено, що на похибку виставки НЧЕ впливає недосконалість технологічного процесу виготовлення засобу вимірювання, експлуатаційна зміна параметрів та характеристик його конструкційних матеріалів і складових елементів, зовнішні та внутрішні збурення (наприклад, електромагнітні поля,

температура, волога, нестабільність напруги живлення тощо). Крім того на результат вимірювання мають суттєвий вплив параметри об'єкта вимірювання, особливості обробки результатів вимірювання (наприклад, округлення проміжних результатів обчислень, недотримання методик вимірювання, обчислення і нормування складових похибок вимірювання). Також дії оператора призводять до похибки базування об'єкта вимірювання на предметному столі засобу вимірювання, похибки наведення та відліку.

6. Сформовано загальні рекомендації щодо підвищення точності та зменшення похибки вимірювання величини плоского кута. При цьому вказано, що найбільшій результативності можна досягти тільки за рахунок комплексного виконання всіх рекомендацій, які стосуються розробки нових та вдосконалення відомих засобів та методів вимірювання, обчислювальних процедур тощо із застосуванням новітніх досягнень науки і техніки, передових інформаційно-комп'ютерних технологій та автоматизації.

7. Проаналізовано відомі сучасні засоби, що можуть бути застосовані для високоточного вимірювання величини плоского кута. Встановлено, що найбільш точними оптичними приладами для безконтактного вимірювання кутів є гоніометри та системи на їх основі. Проте в Україні на сьогодні більшість вітчизняних лабораторій та підприємств використовує технічно застарілі візуальні засоби кутових вимірювань. Це може бути обумовлено високою вартістю більш сучасних високоточних кутовимірювальних систем та комплексів, особливо імпортного виробництва. На підставі вказано сформовано наукову проблему, визначено мету та завдання дослідження.

Перелік літератури до розділу 1

1. Черепанская И. Ю. Планирование, моделирование и верификация процессов в гибких производственных системах: практикум. Учебно – методическое пособие к выполнению практических, лабораторных и самостоятельных занятий студентов, обучающихся в рамках международного проекта TEMPUS “Двойной магистерский диплом по автоматизации / мехатронике стран ЕС – стран партнеров” / И. Ю. Черепанская, В. А. Кирилович, А. Ю. Сазонов, Б. Б. Самотокин. – Житомир, ЖГТУ 2014. – 285 с.

2. Кудрявцев М. Д. Методы планирования и обработки результатов измерений плоского угла для градуировки прецизионных навигационных датчиков: дис. канд. техн. наук: 05.13.01, 05.11.15 “Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) / Михаил Дмитриевич Кудрявцев. – Санкт-Петербург, 2009. – 172 с.

3. Шароглазова Г. А. Основные геодезические работы. Учебно-методический комплекс для студентов специальности 1.56.02.01 “Геодезия”. – Новополюк: УО “ПГУ”, 2007. – 161 с.

4. Конічні роликопідшипники [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.upk1.ru/rolikovyy_konicheskiy

5. Этингоф М. И. Измерения углов и конусов / М. И. Этингоф // Приборы для линейных измерений [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://dopusk.net/?page_id=2016

6. Лазерный интерферометр XL – 80. Система Ballbar QC10. Системы для проверки точности и калибровки станков и координатно-измерительных машин. / ООО Renishaw. // ©2007 Renishaw plc.

7. Павлов М., Павлов И. “Дракон”, испепеляющий танки / М. Павлов, И. Павлов. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.redov.ru/transport_i_aviacija/tehnika_i_vooruzhenie_2010_03/p3.php

8. Челноков Ю. Н. Кватернионные и бикватернионные модели и методы механики твердого тела и их приложения. Геометрия и кинематика движения. – М. Физматлит, 2006. – 512. – ISBN 5 – 9221 – 0680 – 5

9. Матасов А. И., Тихомиров В. В. Калибровка бесплатформенной инерциальной навигационной системы при повороте вокруг вертикальной оси // Труды МАИ. Выпуск № 89. <https://publications.hse.ru/mirror/pubs/share//direct/211513352>

10. Веремеенко, К. К. Савельев В. М. Выставка бесплатформенной инерциальной навигационной системы беспилотного летательного аппарата в полете // Известия РАН. Теория и системы управления, 2013. – №1. – С. 111 – 121.

11. Савельев В. М., Антонов Д. А. Выставка бесплатформенной инерциальной навигационной системы беспилотного летательного аппарата на подвижном основании // Электронный журнал «Труды МАИ». – <http://www/mai.ru/science/trudy/>. – Выпуск №45.

12. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / К. К. Веремеенко, А. Н. Гловинский, В. В. Инсаров и др.; под ред. М. Н. Красильщикова, Г. Г. Себрякова. – М.: Физматлит, 2003. – 280 с.
13. Selig J.M. Introductory robotics / J.M. Selig. – Prentis Hall International (UK) Ltd, 1992. – 152 с.
14. Гавриш А. П. Гибкие производственные системы: [учебник] / А. П. Гавриш, Л. С. Ямпольский. – К.: Вища школа, 1989. – 407 с.
15. Шабайкович В. А. Ориентирующие устройства с программным управлением: Технологические основы проектирования / В. А. Шабайкович. – К.: Техніка, 1981. – 183 с.
16. Ямпольский Л. С., Калинин О. М., Ткач М. М. Автоматизированные системы технологической подготовки робототехнического производства / Л. С. Ямпольский, О. М. Калинин, М. М. Ткач. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1987. – 271 с.
17. Ямпольский Л. С. Автоматизация проектирования и управления в гибком производстве / Л. С. Ямпольский, З. Банашак. – К.: Техніка; Варшава: Науч.-техн. изд-во, 1989. – 214 с.
18. Фу К. Робототехника: [пер. с англ.] / К. Фу, Р. Гонсалес, К. Ли – М.: Мир, 1989. – 624 с.
19. Балк М. Б. Реальные применения мнимых чисел / М. Б. Балк. – К.: Рад. шк., 1988. – 255 с.
20. Кантор И. Л. Гиперкомплексные числа / И. Л. Кантор, А. С. Солодовников. – М.: Наука, 1973. – 144 с.
21. Черепанська І. Ю., Кирилович В. А. Формалізований опис орієнтуючих рухів об'єктів роботизованих механоскладальних виробництв // Оптимизация производственных процессов. – 2006. – №9. – С. 53 – 59.
22. Черепанська І. Ю., Кирилович В. А. Формалізований опис рухів об'єктів роботизації на основі теорії кватерніонів: междунар. научн.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых., 16 – 20 мая 2005, г. Севастополь: Прогресивные направления развития машино- приборостроительных отраслей и транспорта / І. Ю. Черепанська, В. А. Кирилович. – Севастополь: Изд-во СевНТУ. – 2005. – С. 163–164.
23. Коротаев В. В. Точность измерительных оптико-электронных приборов

и систем. Учебное пособие. – Санкт-Петербург, 2011. – 42 с.

24. Черепанська І. Ю., Безвесільна О. М., Сазонов А. Ю. До питання підвищення точності кутових вимірювань гоніометричними системами // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Житомир: ЖДТУ. – 2016. – № 1 (76). С. 92 – 99.

25. Irina Cherepanska, Elena Bezvesilna, Artem Sazonov, Sergey Nechai, Tatiana Khylichenko The procedure for determining the number of measurements in the normalization of random error of an information – measuring system with elements of artificial intelligence // Eastern – European journal of enterprise technologies. – 2017. – № 5/9 (89). – P. 58 – 67.

26. ДСТУ 8.009:2008 Державна система забезпечення єдності вимірювань. Нормовані метрологічні характеристики засобів вимірювань. Київ, 2008. – 20 с.

27. ДСТУ – Н РМГ 63:2013 Державна система забезпечення вимірювань. Забезпечення ефективності вимірювань при управлінні технологічними процесами. Київ, 2013. – 18 с. (Інформація та документація)

28. Шевчук В. П., Капля В. И., Желтоногов А. П., Лясин Д. Н.. Метрология интеллектуальных измерительных систем: монография. ВолгГТУ, Волгоград, 2005. – 210 с.

29. Ian Farrance, Robert Frenkel Uncertainty of Measurement: A Review of the Rules for Calculating Uncertainty Components through Functional Relationships // Clin Biochem Rev. 2012 May. – № 33(2). – P. 49–75.

30. Ванякина М. В. Способы и методы повышения точности измерений // Международный научный журнал “Символ науки”. – 2017. – №03 – 2/2017. – С. 37 – 40.

31. Авторское свидетельство 1640549 (СССР), МПК: G 01 B 21/22 Автоматизированный гониометр для измерения плоских углов многогранных призм / Борисюк Л. В., Коваленко А. Н., Осьмак А. Н., Щербань В. И. – Реєстрац. номер заявки 4698234/28. Заявл. 14.04.89. Напеч. 07.04. 91, Бюл. №13.

32. Авторское свидетельство 1100500 (СРСР), МПК: G 01 B 21/22 Автоматизированный гониометр / Зайцев И. И., Ванюрихин А. И., Зозуля Л. Г., и др. – Реєстрац. номер заявки 3491711/18 – 28. Заявл. 20.09.82. Напеч. 30.06. 84, Бюл. №24.

33. Авторское свидетельство 4864621/28 (СССР), МПК: G 01 В 21/22 Способ измерения угловых перемещений удаленного объекта и устройство для его осуществления / Воробьев С. Г., Глебович Л. А., Стрижова Н. М. – Реестрац. номер заявки 6791715/18 – 28. Заявл. 02.07.90, Напеч. 30.11. 92, Бюл. №44.

34. Авторское свидетельство 4856584/28 (СССР), МПК: G 01 В 21/22 Способ измерения углов отклонения объекта и устройство для его осуществления / Дудко В. А., Богуславский М. Г., Шарова Е. Е. – Реестрац. номер заявки 6791715/18 – 28. Заявл. 15.05.90, Напеч. 07.10.92. Бюл, N 37

35. Авторское свидетельство 4715154/28 (СССР), МПК: G 01 В 21/22 Устройство для контроля углов / Киселев Н. Д., Копейченко В. М., Цепелев М. К., Цветков Н. Т. – Заявл. 11.04.89, Напеч. 30.08.92. Бюл. М 32

36. Авторское свидетельство 4343852/28 (СССР), МПК: G 01 В 11/26 Способ юстировки устройства для измерения плоских углов / Костава Ю. Н., Отаришвили Н. И., Поцхишвили К. В. – Заявл. 15.12.87, Напеч. 30.08.92. Бюл. 32

37. Авторское свидетельство 1187133 (СССР), МПК: G02В 27/30 Фотоэлектрический автоколлиматор / Топильский В. Б., Меньшакова Н. И., Кондрашов К. К. – Заявл. 10.04.1984, Напеч. 23.10.1985. Бюл. 32

38. Патент на изобретение 2319990 (СССР), МПК: G02В 27/30 Фотоэлектрический автоколлиматор / Мужичек С. М., Ефанов В. В., Горшенин А. Ю. – Заявл. 10.07.1989, Напеч. 23.06.1990. Бюл. 23

39. Патент на изобретение 2305305 (СССР), МПК: G02В 27/30 Инфракрасный коллиматорный комплекс / Иванов В. П., Курт В. И., Бугаенко А. Г., Зарипов Р. И. – Заявл. 10.07.1989, Напеч. 11.08.1990. Бюл. 32

40. Патент на изобретение 2304796, МПК: G02В 27/30 Двухканальный оптико-электронный автоколлиматор / Герасюк А. К., Шимкович Э. А., Батова Г. В. – Заявл. 23.10.1995, Напеч. 23.03.1996. Бюл. 24

41. Патент на изобретение 2292067, МПК: G02В 27/30 Инфракрасный коллиматор / Иванов В. П., Белозеров А. Ф., Бугаенко А. Г. и др. – Заявл. 23.10.1995, Напеч. 23.03.1996. Бюл. 32

42. Патент на изобретение 2279702, МПК: G02В 27/30 Коллимирующая оптическая система для полупроводниковых лазеров / Шипунов А. Г., Амосов Н. В., Погорельский С. Л. и др. – Заявл. 23.10.1995, Напеч. 23.03.1996. Бюл. 24

43. Патент на изобретение 2779702 МПК: G02B 27/30 Коллиматорный визир / Беляева Г. Г., Полежаев В. В. – Заявл. 23.10.1991, Напеч. 23.03.1992. Бюл. 13
44. Патент на изобретение МПК: G02B 27/30 Коллимирующая оптическая система для полупроводниковых лазеров / Бушмелев Н. И., Лазукин В. Ф., Погорельский С. Л. и др.. – Заявл. 23.10.1994, Напеч. 23.03.1996. Бюл. 23
45. Филатов Ю. В. Методы и средства лазерной гониометрии: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.11.07 “Оптические и оптико-электронные приборы” / Филатов Юрий Владимирович – Ленингр. ин-т точной механики и оптики. Л.: ЛИТМО, 1991. – 32 с.
46. Сушков А. С. Разработка средств и методов высокоточных интерференционных угловых измерений в геодезии : дис. канд. техн. наук : 05.24.01 “Геодезия” / Аркадий Сергеевич Сушков. – М., 1984. – 127 с.
47. Береза Б. В. Разработка и исследование лазерной гониометрической системы контроля средств измерений угловых параметров движения: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: 05.13.14 “Системы обработки информации и управления” / Борис Владиленович Береза. – Санкт-Петербург, 1993. – 20 с.
48. Авторское свидетельство 1495642 (СССР), МПК: G01B 9/10 Автоматический гониометр – спектрометр / Виноградов Е. Ф., Демчук В. Ю., Зайцев И. И., Зозуля Л. Г. и др. – Заявл. 15.04.1987, Напеч. 23.17.1989. Бюл. 27
49. Авторское свидетельство 1250848 (СССР), МПК: G01B 11/26 Способ измерения углов, образуемых тремя гранями призмы, и устройство для его осуществления / Горшков В. А., Фомин О. Н., Лозбенев Е. И., Жданов А. И., Бурлак Ю. А., Соломатин В. А., Шилин В. А., Луценко Н. Л. – Заявл. 21.01.1985, Напеч. 15.08.1986. Бюл. 30
50. Авторское свидетельство 1753261 (СССР), МПК: G01B 11/26 Способ измерения прямого угла призм / Елисеев Ю. В., Иванов В. Ф. – Заявл. 31.10. 1989, Напеч. 07.08.1992 Бюл. 30
51. Авторское свидетельство 181840 (СССР), МПК: G02B 27/30, G02B 5/04 Призма ПГ для поворота светового пучка в автоколлиматоре / Гукайло М. Я. – Заявл. 916356, Напеч. 01.01.1966. Бюл. 10
52. Кривцов, Е. П. Исследование погрешности воспроизведения единицы

плоского угла кольцевым лазером / Е. П. Кривцов, Ю. В. Филатов // Измерительная техника, 1989. – № 12. – С. 11.

53. Блантер, Б. Е. Экспериментальное исследование точности магнитных преобразователей / Б. Е. Блантер // Измерительная техника. – 1977. – № 7. – С.40.

54. Лазерные измерительные системы /А. С. Батраков и др.; под ред. Д. П. Лукьянова М.: Радио и связь, 1981.

55. Метод анализа точностных характеристик датчиков угла /В. А. Смирнов и др. // Измерительная техника. – 1991. – № 4. – С. 7.

56. Двухканальный прецизионный преобразователь угла /И. П. Глаголев и др. // Измерительная техника. – 1991. – № 4. – С. 8.

57. Домрачев, В. Г. Цифровые преобразователи угла: Принципы построения, теория точности, методы контроля / В. Г. Домрачев, Б. С. Мейко. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 328 с.

58. Кривцов Е. П. О точности интерференционного нуля – индикатора / Е. П. Кривцов, П. А. Павлов, А. М. Юдин // Применение лазеров: сб. Л., 1984.

59. Филатов, Ю. В. Анализ работы интерференционного углового нуля – индикатора / Ю. В. Филатов // Оптико-механическая промышленность. – 1989. – №4. – С. 13 – 17.

60. Лукьянов Д. П. Разработка унифицированного ряда лазерных гониометрических систем для машиностроения / Д. П. Лукьянов, П. А. Павлов, Ю. В. Филатов // Применение лазеров: тез. докл. III Всесоюз. научн.-техн. конф., Таллинн, 1987.

61. Лукьянов Д. П. Прецизионные бесконтактные системы контроля углового положения объекта / Д. П. Лукьянов, П. А. Павлов, Ю. В. Филатов. – Л.: ЛДНТП, 1984. – 24 с.

62. Лукьянов Д. П. Лазерный измеритель параметров углового движения объекта / Д. П. Лукьянов, П. А. Павлов, А. М. Юдин // Применение лазеров: сб. Л., 1984.

63. Павлов П. А. Контроль углового положения станда с помощью лазерного гониометра / П. А. Павлов, А. М. Юдин // Изв. Ленингр. электротехн. ин-та, 1985. – Вып. 352. – С. 5.

64. Исследование бесконтактного лазерного измерителя / Е. П. Кривцов, П. А. Павлов, Ю. В. Филатов, А. М. Юдин. Таллин, 1987. – С.64.

65. Павлов П. А. Лазерное угломерное устройство с расширенным диапазоном измерения / П. А. Павлов, Ю. В. Филатов, А. М. Юдин // Изв. Ленингр. электротехн. ин-та, 1990. – № 427. – 63 с.
66. Филатов Ю. В. Исследование погрешности лазерного измерителя углового положения объекта / Ю. В. Филатов // Изв. Ленингр. электротехн. ин-та, 1988. – Вып. 400. – С. 56.
67. Павлов П. А. Анализ погрешности измерения угла при использовании телескопической системы / П. А. Павлов, А. М. Юдин // Изв. Ленингр. электротехн. ин-та, 1986 – Вып. 366. – С. 65.
68. Кольцов И. М. Интерференционное устройство регистрации нулевого положения / И. М. Кольцов, В. М. Лекомцев, В. П. Михеев // Измерительная техника, 1976. – № 7. – С.29.
69. Ванюрихин А. И. Автоматизированный гониометр на основе кольцевого лазера Текст. / Ванюрихин А. И., Зайцев И. И. // Оптико-механическая промышленность, 1982. – № 9.
70. Высокоточные угловые измерения Текст. / Д. А. Аникст, К. М. Константинович, И. В. Меськин [и др.]; под ред. Ю. Г. Якушенкова – М.: Машиностроение, 1987. – 480 с.
71. Мейко Б. С. Цифровые преобразователи угла: Принципы построения, теория точности, методы контроля / Мейко Б. С. Домрачёв В. Г. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
72. Бычков С. И. Лазерный гироскоп / Бычков С. И., Лукьянов Д. П., Бакаляр А. И., под ред. проф. С. И. Бычкова. М.: “Сов. Радио”, 1975. – 424 с.
73. Ахметжанов А. А. Системы передачи угла повышенной точности / М. – Л.: “Энергия”, 1966. – 272 с.
74. Батраков А. С. Лазерные измерительные системы / Батраков А. С., Бутусов М. М., Лукьянов Д. П. [и др.] – М.: Радио и связь, 1981.
75. Патент 44131 (Україна), МПК: G01B 11/26 Система високоточного вимірювання кута з відео зйомкою / Ткаченко Т. С., Безвесільна О. М. – Заявл. 01.03. 1990, Надр. 25.09.2009 Бюл. 19
76. Патент на винахід 111408 (Україна), МПК: G01C 19/56 Спосіб компенсації температурної погрішності масштабного коефіцієнта вібраційного

гіроскопа / Цирук В. Г., Маляров С. П., Чіковані В. В., Петренко О. В. – Заявл. 04.09.2014, Надр. 25.04.2016 Бюл. 5.

77. Патент на винахід 79166 (Україна), МПК: G01C 19/56 Циліндричний чутливий елемент коріолісового вібраційного гіроскопа / Чіковані В. В., Коваленко В. А., Яценко Ю. О. – Надр. 25.05.2007.

78. Патент на винахід 24037 (Україна), МПК: G01C 19/00 Півсферичний резонаторний гіроскоп з складовим резонатором / Коваленко В. А., Щербань В. І., Яценко Ю. О., Чіковані В. В. – Надр. 11.06.2007.

79. Патент на винахід 13299 (Україна), МПК: H01S 3/08 Лазерний гіроскоп “МАСПЕТ” / Маслов В. П., Петренко С. Ф. – Надр. 15.03.2006

80. Лукьянов Д. П., Филатов Ю. В., Чиковани В. В. Привязка опорных направлений к плоскости истинного меридиана с помощью лазерного гониометра. – Применение лазеров в системах передачи, преобразования и обработки информации: Материалы краткосрочного семинара. – Л. ЛНТП, 1981. – 87 с.

81. Лукьянов Д. П., Филатов Ю. В., Чиковани В. В. К оценке точностных характеристик лазерного гониометрического компаса. – Изв. ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина). – 1981. – серия Корабельные комплексы. – вып. 289. – С. 47 – 56.

82. Лукьянов Д. П., Чиковани В. В. Экспериментальные исследования погрешностей гониометрического компаса для анализа возможности синтеза фильтра Калмана. – Изв. ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина). – 1982. – вып. 307. – С. 110 – 114.

83. Филатов Ю. В., Чиковани В. В. Влияние дрейфа лазерного гироскопа на погрешность гониометрического компаса. – Изв. ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина). – сер. Корабельные комплексы. – 1987. – вып. 387. – С. 56 – 61.

84. Чиковани В. В. Коррекция регулярного дрейфа нуля лазерного гироскопа в движении в лазерном хранителе опорного направления. – Вопросы оборонной техники. – 1988. – серия XII. – вып. 4. – С. 40 – 46.

85. Довгопольний А. С., Вороб'єв В. М., Попов К. М., Чиковани В. В. Принципы построения систем начальной выставки в азимуте систем навигации на безроторных гироскопах. – Труды XVII Межотраслевой научно-технической конференции памяти Н. Н. Острякова, 4 – 6 декабря 1990. – Л.: ЦНИИ Электроприбор, 1990. – С. 78 – 81.

86. Борисюк М. Н., Попов К. М., Чиковани В. В. Методы исключения

погрешности лазерного гироскопа в составе бесплатформенных инерциальных навигационных систем. – Анал. обзор (брошюра) № 5231.– часть 2. – “Хранители направления”. – М.: ЦНИИИЭИ, 1991. – 91 с.

87. Чіковані В. В., Яценко Ю. А., Янчук О. М., Яценко Г. Ю. Температурна корекція дрейфу та масштабного коефіцієнту коріолісового вібраційного гіроскопа. – Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2004, № 2, С. 91 – 96.

88. Патент на винахід 53172 (Україна), МПК: G01B 11/30 Спосіб контролю площинності граней багатогранних призм / Безвесільна О. М., Зайцев Ю. І., Старцев С. М. – Надр. 15.01.2003

89. Патент на винахід 53171 (Україна), МПК: G01B 9/10, G01B 11/26 Спосіб вимірювання кутів за допомогою гоніометра / Старцев С. М., Безвесільна О. М., Зайцев Ю. І., Янчук О. М. – Надр. 15.01.2003

90. Патент на винахід 52133 (Україна), МПК: G01B 9/00, G01B 9/10, G01C 1/00 Гоніометр / Тулупов Д. Г., Безвесільна О. М. – Надр. 16.12.2002

91. Патент на винахід 119875 (Україна), МПК: G01C 1/00, G01B 9/10 Гоніометр / Коротун М. М., Криворучко Д. В., Басов Б. С. – Заявл. 03.05.2017. Надр. 10.10.2017, Бюл. 19

92. Агапов М. Ю. Разработка и исследование гониометрических систем контроля преобразователей угла: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.11.16 “Информационно – измерительные и управляющие системы (приборостроение)” / Михаил Юрьевич Агапов. – Санкт-Петербург, 2009. – 17 с.

93. Аксененко В. Д. Автоматическая коррекция погрешности датчиков угла / В. Д. Аксененко // Авиакосмическое приборостроение. – 2003. – № 6. – С. 2 – 7.

94. Барина Е. А. Методика уменьшения систематической погрешности лазерного динамического гоніометра / Е. А. Барина [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.eltech.ru/ru/nauchnaya-i-innovacionnaya-deyatelnost/innovacionnaya-deyatelnost/programma-umnik/metodika-umensheniya-sistematicheskoy-pogreshnosti-lazernogo-dinamicheskogo-goniometra-dlya-kalibrovki-mnogogrannyh-prizm>

95. Барина Е. А. Разработка и исследование методов повышения точности гониометрических систем: дис. канд. техн. наук: 05.11.16 “Информационно – измерительные и управляющие системы (приборостроение)” / Елена Анатольевна

Баринова. – Санкт-Петербург, 2009. – 167 с.

96. Береза Б. В. Разработка и исследование лазерной гониометрической системы контроля средств измерений угловых параметров движения: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: 05.13.14 “Системы обработки информации и управления” / Борис Владиленович Береза. – Санкт-Петербург, 1993. – 20 с.

97. Гончаров Н. В. Разработка и исследование динамического гониометра на основе фотоэлектрического преобразователя угла: дис. канд. техн. наук: 05.11.16 “Информационно – измерительные и управляющие системы (по отраслям)” / Никита Викторович Гончаров. – Санкт-Петербург, 2005. – 125 с.

98. Кудрявцев М. Д. Методы планирования и обработки результатов измерений плоского угла для градуировки прецизионных навигационных датчиков: дис. канд. техн. наук: 05.13.01, 05.11.15 “Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)” / Михаил Дмитриевич Кудрявцев. – Санкт-Петербург, 2009. – 172 с.

99. Павлов П. А. Разработка и исследование высокоточных лазерных гониометрических систем: дис. доктора техн. наук: 05.11.16 “Информационно-измерительные и управляющие системы (приборостроение)” / Петр Алексеевич Павлов – Санкт-Петербург, 2008. – 280 с.

100. Сушков А. С. Разработка средств и методов высокоточных интерференционных угловых измерений в геодезии: дис. канд. техн. наук: 05.24.01 “Геодезия” / Аркадий Сергеевич Сушков. – М., 1984. – 127 с.

101. Филяевских Р. И. Видеоцифровая система оптического рефрактометра / Р. И. Филяевских, М. А. Ган // Научно-производственная корпорация “Государственный оптический институт имени С. И. Вавилова”. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.oop-ros.org/maket/part3/3_7.pdf

102. Национальный эталон единицы плоского угла – градуса. Белорусский государственный институт метрологии [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.belgim.by/edinitysi_ploskogo_ugla_gradusa/

103. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерения плоского угла. ГОСТ 8.016-81. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1981. – 8 с.

104. Гониометр статический СГ – 1Ц. Priboy – si.ru / Каталог приборов и их

производителей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pribory-si.ru/catalog/2711-01/1369/>

105. BI-200SM. Исследовательский гониометр для определения характеристик светорассеяния на любых углах. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.soctrade.com/laboratornoe_oborudovanie/bi-200sm-issledovatel'skij-goniometr-dlya-opredeleniya-harakteristik-svetorasseyaniya-na-lyubyh-uglah.phtml

106. DataPhysics Instruments GmbH. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rusnanonet.ru/equipment/list/?producer=dataphysics>

107. Гониометры. Новейшие измерительные технологии / ЗАО НПФ “Уран”. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.uran-spb.ru/catalog/216/>

108. Производство средств угловых измерений. Научно-производственный комплекс “Диагностика” [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.diagnostika-spb.ru/index.html>

109. Practical Design Techniques For Sensor Signal Conditioning / Analog Devices. – Prentice Hall, 1999. – 366 p.

110. Автоматизированные прецизионные оптические средства угловых измерений / ООО “ИНЕРТЕХ”. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://inertech.org/index.php>

111. Автоматический радиокompас APK-15M. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://armyman.info/books/id-387.html>

112. N. Manivannan, M. A. A. Neil, “Automatic angle measurement of a 2D object using optical correlator – neural networks hybrid system”, *Proc. SPIE 8055, Optical Pattern Recognition XXII*, 80550C (26 April 2011); (DOI: 10.1117/12.883653). [Electronic resource]. – Access: <https://doi.org/10.1117/12.883653>

113. Yang Li, Pan Fu, Zhong Li, Xiaohui Li, Zhibin Lin “Biaxial Angle Sensor Calibration Method Based on Artificial Neural Network”, *Chemical Engineering Transactions*, pp 361 – 366, 2015, Vol. 46. (DOI: 10.3303/CET1546061). [Electronic resource].

Access: pdfs.semanticscholar.org/e9fa/3d64168e871ee978d5e711bd9e0115792529.pdf

114. DataPhysics Instruments GmbH Raiffeisenstraße 34 D – 70794 Filderstadt

Germany [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
http://www.nglabtec.com/dataphysics2/cat_da/DCAT11_E_Brochure.pdf

115. Moller-Wedel GmbH [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
<http://www.moeller-wedel-optical.com/produkte/goniometer/gonio-spektrometer.ht>

116. Гониометр // КП СПб Арсенал [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
<http://zavodarsenal.kiev.ua/goniometr-spektrometr-gs2/>

117. DataPhysics Instruments GmbH Raiffeisenstraße 34 D – 70794 Filderstadt
 ·Germany [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
http://www.nglabtec.com/dataphysics2/cat_da/DCAT11_E_Brochure.pdf

118. Динамический гониометр ДГ-03Л. Научно-производственный комплекс
 “Диагностика” [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://diagnostika-spb.ru/pdf/DG-03L.pdf>

119. Moller-Wedel GmbH [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
<http://www.moeller-wedel-optical.com/produkte/goniometer/gonio-spektrometer.ht>

120. Углоизмерительная система ГС1Л. КП СПб “Арсенал”. // Портал
 “Поставщики машин и оборудования”. [Электронный ресурс] – Режим доступа:
http://ukraina.oborudunion.ru/i_store/item_1000014315/ugloizmeritelnaya-sistema-gs1l.html

121. Мазуров В. И. Болезни суставов Клинические методы исследования опорно-
 двигательного аппарата – заболевания суставов / В. И. Мазуров [Электронный ресурс].
 – Режим доступа: http://bone-surgery.ru/view/klinicheskie_metody_issledovaniya_oporno-dvigatel'nogo_apparata-_zabolevani

122. S. Li, C. W. Armstrong, and D. Cipriani, “Three – point gait crutch walking:
 Variability in ground reaction force during weight bearing,” Arch. Phys. Med. Rehabil.,
 2001. – Vol. 82, – No. 1, – P. 86 – 92.

123. Naoaki Tsuda, Akane Hayashi, Motoi Tounai and Susumu Akutagawa,
 “Visualization system of crutch walking based on internal sensors” International Conference
 on Advanced Intelligent Mechatronics, Montréal, Canada, July 6 – 9, 2010. – P. 19 – 24.

124. J. – U. Lee et al., “Analysis of plantar foot pressure during the non – crutch
 two – point, and four – point crutch gait performed by healthy volunteers” J. Phys.
 Therapy Sci., 2011. – Vol. 23. – No. 3. – P. 489–493.

125. J. Fischer, C. Nüesch, B. Göpfert, A. Mündermann, V. Valderrabano, and

Hügler, "Forearm pressure distribution during ambulation with elbow crutches: A cross – sectional study," J. NeuroEng. Rehabil., 2014. – Vol. 11. – No. 1. – 61 p.

126. Bezvesilnaya E., Zaysev Y. Angle Measuring Instruments On Laser Gyro Base. Symposium gyro Technology, 1999, Stuttgart, Germani, P. 80 – 89.

127. Акпаров В. В. Полупроводниковый кольцевой лазер и его применение в качестве датчика вращения: Дис. канд. физ. – мат. наук: 01.04.21 "Лазерная физика" / Владимир Валерьевич Акпаров. – М., 2011. – 144 с.

128. Иващенко Е. М. Разработка методов исследования динамических гониометров для калибровки преобразователей угла: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: 05.11.16 "Информационно – измерительные и управляющие системы (приборостроение)" / Елена Михайловна Иващенко. – СПб., 2013. – 17 с.

129. Капля Е. В., Кузнецов В. С., Шевчук В. П. Моделирование процессов управления в интеллектуальных измерительных системах. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 512 с.

130. Національні еталони України. Перелік національних еталонів станом на 01.02.2019 р. // Національний науковий центр "Інститут метрології" [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.metrology.kharkov.ua/index.php?id=55>

131. МИ 1758–87 "Державна система забезпечення єдності вимірювань. Міри плоского кута призматичні. Методика повірки"

132. ГОСТ 8.016–81 "Державний первинний еталон і державна повірочна схема для засобів вимірювання плоского кута"

133. Цифровой автоколлиматор. Elcomat 3000 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://kazinmetr.kz/bd/reestr/sipma/24284/>

134. Безвесільна О. М. Автоматизований прецизійний пристрій для вимірювання кутів: Монографія. – Житомир: ЖДТУ, 2010. – 258 с.

135. Углотельная система ГС1Л [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://goniometer.ru/gsl.html>

136. Измерение показателя преломления на гониометре в динамическом режиме / Г. Н. Вишняков, Г. Г. Левин, С. В. Корнышева, Г. Н. Зюзев, М. Б. Людомирский, П. А. Павлов, Ю. В. Филатов // Оптический журнал, 2005. – Т. 72, № 12. – С. 53 – 58.

137. Корнышева С. В. Измерение показателя преломления методом лазерной динамической гониометрии: автореф. дис. канд. техн. наук: 01.04.05 “Оптика” / Корнышева Светлана Владимировна – Москва, 2012. – 25 с.

138. Николаев М. С. Разработка и исследование методов измерения межгранных углов прозрачных призм на основе динамического гониометра: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.11.16 “Информационно – измерительные и управляющие системы (приборостроение)” / Николаев Максим Сергеевич – Санкт-Петербург. – 2012. – 25 с.

139. Греченева А. В. Фазометрический метод гониометрического контроля на базе акселерометрических преобразователей: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.11.13 “Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий” / Греченева Анастасия Владимировна – Белгород. – 2019. – 25 с.

140. Павлов П. А. Особенности метода кросс-калибровки в лазерной гониометрии / П. А. Павлов // Измерительная техника. – 2015. – № 9. – С. 21 – 24

141. Иващенко Е. М. Разработка методов исследования динамических гониометров для калибровки преобразователей угла: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.11.16 “Информационно – измерительные и управляющие системы (приборостроение)” / Иващенко Елена Михайловна – Санкт-Петербург – 2013. – 23 с.

142. Батаян П. В., Коняхин И. А., Панков Э. Д. Контрольные элементы автоколлимационных угломеров с улучшенными метрологическими характеристиками // Оптический журнал. – 1997 – №1

143. Широкодиапазонные оптико-электронные автоколлиматоры на основе использования оптической равносигнальной зоны / Крайлюк А. Д., Мусяков В. Л., Панков Э. Д., Тимофеев А. Н., Ли Шифан // Известия вузов. Приборостроение, 2003. – Т. 46. – № 8.

144. Бурнашев М. Н., Лукьянов Д. П., Павлов П. А., Филатов Ю. В.. Развитие методов и средств динамической лазерной гониометрии. Квантовая электроника. – 2000. – Т. 30. – №2. – С. 141–146.

145. Гончаров Н. В. Разработка динамического гониометра на основе фотоэлектрического преобразователя угла / Н. В. Гончаров // Молодые исследователи региону. – Вологда: ВоГТУ, 2001. – 114 с.

146. Гончаров Н. В. Развитие гониометрических методов и средств контроля

углового положения объекта / Н. В. Гончаров, Ю. В. Филатов // Гироскопия и навигация. – 2002. – №3(38). – С. 123 – 126.

147. Лазерные гониометрические системы для калибровки преобразователей угла / М. Ю. Агапов, М. Н. Бурнашев, Д. П. Лукьянов, П. А. Павлов, Ю. В. Филатов. СПб.: Известия СПбГЭТУ “ЛЭТИ”. – 2007.

148. Результаты калибровки МП с помощью лазерного гониометра ИУП-1Л / Ю. В. Филатов, П. А. Павлов. СПб.: Известия ЛЭТИ. Сборник научных трудов. 1997 – № 509. – 41 с.

149. Calibration of high resolution electronic autocollimators against an angle comparator / A. Just, M. Krause, R. Probst, R. Wittekohf // Metrologia. – 2003. – Vol. 40. – P. 288 – 294.

150. Tentori, D. Refractometry by minimum deviation: accuracy analysis /D. Tentori , J. R. Lermis i I Optical Engineering. – 1990 – Vol. 29, No 2. – P. 160 – 168.

151. Alan, J. Werner Methods in high precision refractometry of optical glasses / J. Alan // Applied Optic. 1968. – Vol.7. – N5. – P. 837 – 843.

152. Probst R. Measurement of angle and flatness diviations of polygon prism faces bsing a phase-shifting interferometer / R. Probst // VDI Berichte NR, 1994. – №118. – P. 173.

153. Automatic high precision calibration system for angle encoder /T. Watanabe et al. // Proceeding of SPIE. 2001. – Vol. 4401. – P. 267 – 274.

154. Calibration of high resolution electronic autocollimators against an angle comparator / A. Just et al. // Metrologia. – 2003. – Vol. 40. – P. 288 – 294.

155. Two-dimensional real-time photoelectric autocollimator with double high sensitivity. Zhaoxiang Ge, Xiangning Li, Xiaoyang Wu. Proceedings of SPIE Volume: 3898 Photonic Systems and Applications in Defense and Manufacturing. Nov, 1999.

156. Cosijns S.J.A.G., Haitjemna H., Schellekens P.H.J. Modelling and verifying non-linearities in heterodyne displacement interferometry. Precision Engineering, 2002. – №26 (4). – P. 448 – 455

157. Shroeder et al. Phase stepping interferometry: methods for reducing errors caused be camera nonlinearities. Appl. Opt., 2002. – 41 p.

158. T.Watanabe, H.Fujimoto, K.Nakayama et all. /Automatic high precision calibrating system for angle encoder. The American Physical Society. 13 march 2001. Session K40. <http://flux.aps.org/meetings/YR01/MAR01/abs/G4060083.html>

159. Huiskes R. A survey of finite element analysis in orthopedic biomechanics: first decade / R. Huiskes, E.Y.S. Chao./ J Biomech. – 1983. – Vol. 16. – P. 385 – 409.
160. Doscher, James. Accelerometer Design and Applications Analog Devices/ James Doscher // Company brochure, Norwood, MA, 61pp. Elwenspoek, M. and Wiegerink, R. Mechanical Microsensors. New York: Springer. – 1993. – P. 132 – 145.
161. Van, H. V. Auto – calibration of accelerometer data for free – living physical activity assessment using local gravity and temperature: an evaluation on four continents / Van, H. V. T., Fang, Z., Langford, J., et al. – Journal of Applied Physiology. – 2014. – Vol 117. – P. 738 – 744.
162. Doscher, J. Accelerometer Design and Applications / J. Doscher. Analog Devices. 1998. – 145 c.
163. Haiying, H, Modeling Inertial Sensors Errors Using Allan Variance / H Haiying. University of Calgary URL: http://www.ucalgary.ca/engo_webdocs/NES/04.20201.HaiyingHou.pdf
164. Yuskel, Y. Notes on Stochastic Errors of Low Cost MEMS Inertial Units / Yiter Yuskel, Huseyn Burak Kaygisiz. – 39 p.: URL: http://instk.org/web/static/bibliography/Introduction_to_Sensor_Errors.pdf
165. Fisher, J. Using an Accelerometer for Inclination Sensing by Christopher / J.Fisher // Analog Devices. – 2010. – 8 p.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МОДЕЛІ ПРЕЦИЗІЙНОЇ ПРИЛАДОВОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ

Науковою основою розробки та побудови пропонованої прецизійної приладової системи вимірювання кутів (ППСВК) підвищеної точності та швидкодії є синтез її моделі, яка відображає певні характеристики ППСВК необхідні для вирішення проблеми підвищення точності та швидкодії вимірювання плоских кутів.

Загальним підходом до побудови пропонованої ППСВК є системний підхід, при якому пропонована ППСВК розглядається як ціле, що складається із частин і елементів, які володіють цілісним характером виконуваних функцій. Одним із типів моделей, які виступають сучасним ядром наукового моделювання, є *системні моделі* [1, 2, 3], які будуються в основному на базі фізичних законів і гіпотез про те, як система структурована, і як вона функціонуватиме. Використання системних моделей передбачає можливість працювати в технологіях віртуального та імітаційного моделювання, а також в системах реального часу. При побудові системної моделі пропонованої ППСВК можна використати різні способи її подання (різні рівні її абстрактного (тобто уявного) опису) [1], що дають змогу синтезувати формалізований опис пропонованої ППСВК або її складових (рис. 2.1) у вигляді інформаційної моделі та структурної схеми (див. далі).

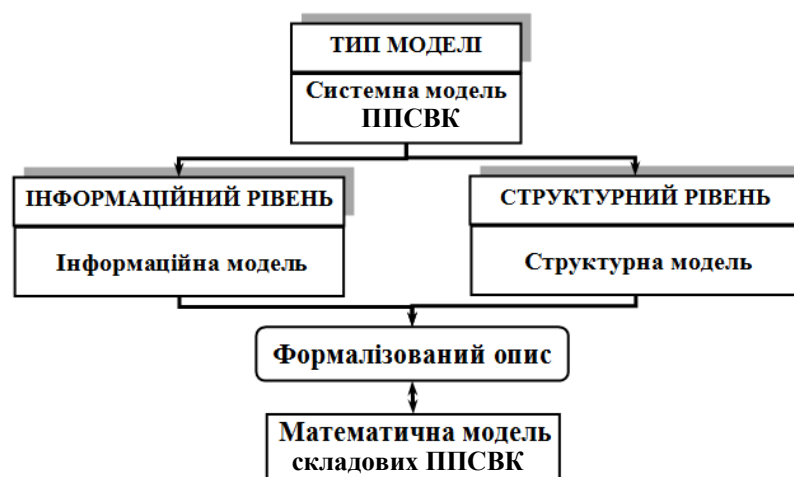


Рис. 2.1. Склад та рівні системної моделі пропонованої ППСВК

Побудова пропонованої ППСВК підвищеної точності та швидкодії повинна здійснюватись з врахуванням можливостей найкращих світових зразків

гоніометричних систем (зокрема точності та швидкодії), а також найкращих здобутків вітчизняного приладабудування в галузі гоніометричних вимірювань, зокрема відомої кутовимірювальної системи ГС1Л, яка є першим комерційним приладом, розробленим КП СПБ “Арсенал” (м. Київ, Україна) сумісно з кафедрою приладабудування Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського” [4, 5]. Також при побудові ППСВК, необхідно уявляти її функціонування, зіставляти функціональні можливості з доступними ресурсами (технічними складовими системи, математичним та програмним забезпеченням тощо) та обмеженнями на них, з врахуванням сучасних принципів та підходів до побудови вимірювальних систем.

Відповідно до вказаного очевидно, що підґрунтям побудови пропонованої ППСВК виступає цільова функція $F(x)$, яка прямує до \max та на певному рівні абстрагування корелює із точністю та швидкістю вимірювання, а також множиною функціональних можливостей пропонованої ППСВК:

$$F(x) = f(\Phi(\Delta); \Phi(\tau); \Phi(\xi)) \rightarrow \max, \quad (2.1)$$

де $\Phi(\Delta)$ – функціонал, що корелює із точністю ε , яка пов’язана з величиною похибки Δ : $\Phi(\Delta) = (\Delta \leq 0,12'')$, де $0,12''$ – похибки сучасних гоніометричних систем найкращих світових зразків;

$\Phi(\tau)$ – функціонал, що корелює із часом вимірювання τ , який включає в тому числі час обробки вимірювальної інформації: $\Phi(\tau) = (\tau \equiv \tau_{\pi})$, де τ_{π} – режим реального часу при якому обробка інформації здійснюється зі швидкістю розвитку подій;

$\Phi(\xi)$ – функціонал, що корелює із множиною $n_i | i = \overline{1, I}$ функціональних можливостей ξ : $\Phi(\xi) = (\xi \geq n_i | i = \overline{1, I})$, де i – найменування функціональних можливостей, наприклад, “вимірювання плоских кутів”, “вимірювання спектральної випромінюваної здатності” та ін.

2.1. Формулювання принципів побудови прецизійної приладової системи вимірювання кутів

При побудові пропонованої ППСВК застосовано певні підходи та принципи, комплексне дотримання яких, дозволяє досягти покращення основних

характеристик пропонованої ППСВК, зокрема точності та швидкодії вимірювання, а також розширити функціональні можливості, і як результат, підвищити якість вимірювання в цілому та конкурентоспроможність.

Загальним підходом до побудови пропонованої ППСВК, який дозволяє підвищити точність та швидкодію вимірювання кутів, а також скоротити терміни проектування ППСВК є системний підхід. Відомими є наукові роботи щодо побудови різних технічних систем, в тому числі приладових гоніометричних систем, які ґрунтуються на засадах системного підходу [64 – 68, 70, 71, 72, 74, 82 – 85] та застосовують принципи декомпозиції структурної схеми [64, 66, 67, 68, 70, 71, 72, 74, 82 – 85], комплексування [68, 70, 71, 72, 74, 82], модульності [64, 66, 67, 68, 70, 71, 83, 84], що безперечно підтверджує можливість застосування цих, а також низки інших принципів при побудові пропонованої ППСВК.

При системному підході щодо побудови технічних систем, в тому числі пропонованої ППСВК система розглядається як ціле, що складається із частин і елементів, які володіють цілісним характером виконуваних функцій (рис. 2.2).

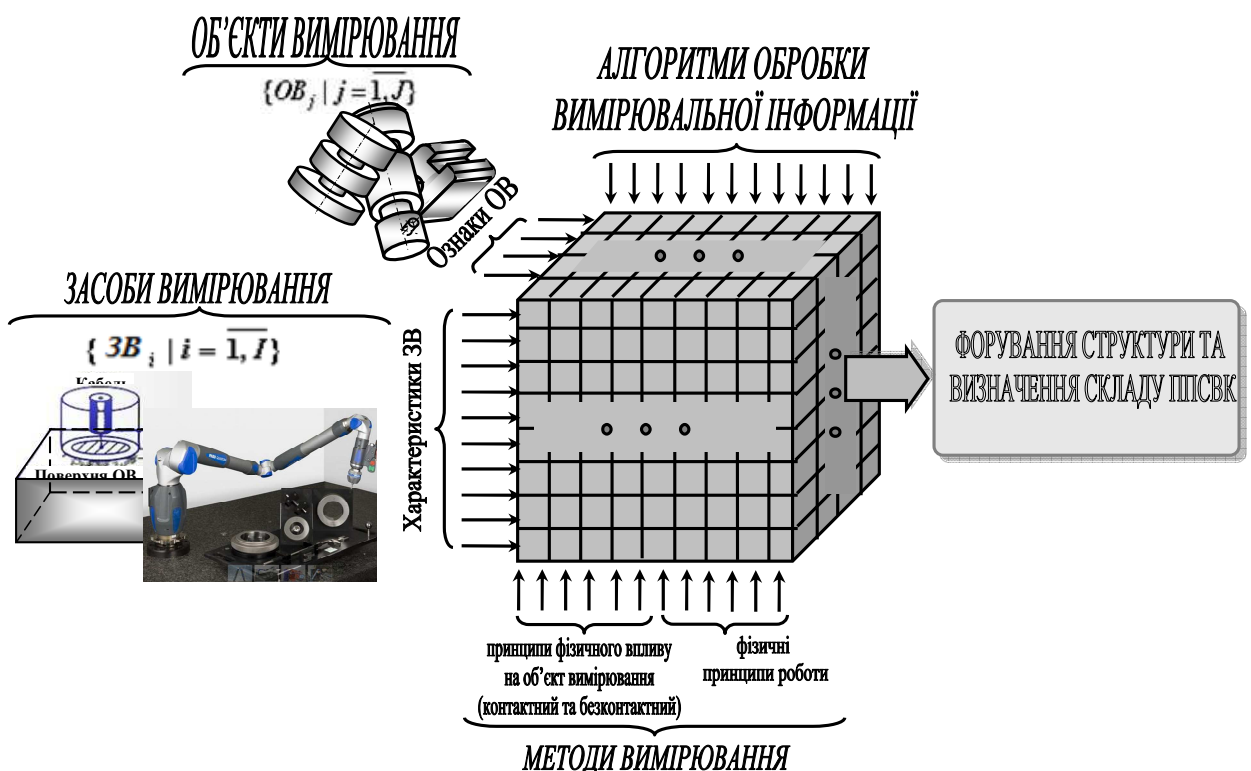


Рис. 2.2. Графічна інтерпретація функціональної взаємодії апаратних засобів, методів та алгоритмів вимірювання кутів

Аналіз інформаційних джерел, в яких описуються приладові системи

вимірювання та їх проектування / побудова / синтез [4 – 11, 15, 17, 18, 19, 22, 40, 41, 46, 51, 52, 59, 63 – 68, 70– 72, 74, 82 – 85], а також автоматизований синтез та проектування інших складних технічних систем [1, 2, 9, 64], дозволив сформувати низку приведених далі принципів побудови пропонованої ППСВК з підвищеною точністю та швидкодією (рис. 2.3).



Рис. 2.3. Принципи побудови пропонованої ППСВК та очікувані результати

Зокрема комплексне дотримання принципів модульності, інваріантності (гнучкості), автоматизованості, ієрархічності, агрегування (комплексування), структурованості, системності, емерджентності (виникнення), цілісності (автономності, незалежності), декомпозиції та композиції, результативності (завершеності), синергетизму дозволяє покращити характеристики пропонованої ППСВК, зокрема підвищити точність та швидкість вимірювання, а також розширити функціональні можливості (в частині аналізу інтенсивностей спектрального розподілу для визначення хімічного складу металовмісних матеріалів) (рис. 2.3).

2.1.1 Принцип модульності побудови прецизійної приладової системи вимірювання кутів

Принципи модульності є одними із прогресивних принципів побудови (проектування) різних технічних систем [64, 66, 67, 68, 70, 71, 72, 83, 84]. Принцип

модульності передбачає поділ процесу побудови / проектування системи на окремі складові, що дозволяє частково зменшити складність цього процесу та дозволяє покращити детальне про опрацювання складових системи [72].

Застосування принципу модульності при побудові пропонованої ППСВК пов'язане з можливістю декомпозиції пропонованої ППСВК на низку взаємозв'язаних між собою модулів, зокрема модулю первинних перетворювачів (датчиків), модулю перетворення (обробки інформації), модулю зв'язку або передачі інформації. При чому виходячи із позицій системності вказані модулі утворені із певних елементів утворюють відповідні підсистеми: прецизійного вимірювання кута (ПВК), узгодження і перетворення інформації (УПІ), обробки та відображення сигналу (ОВС).

При побудові пропонованої ППСВК за принципами модульності з дотриманням концепції уніфікації, що полягає у застосуванні в складі пропонованої ППСВК уніфікованих вузлів та елементів, які серійно випускаються промисловістю досягається взаємозамінність та уніфікація, що є передумовою до подовження часу експлуатації, спрощення модернізації тощо.

Очікувані результати застосування принципу модульності побудови пропонованої ППСВК:

- 1) скорочення часу побудови, завдяки застосуванню складових елементів, які випускаються промисловістю;
- 2) підвищення надійності роботи, завдяки застосуванню складових елементів, які позитивно зарекомендували себе щодо відповідності таким показникам надійності, як інтенсивність відмов, напрацювання на відмову, ймовірність безвідмовної роботи тощо;
- 3) підвищення швидкості та точності вимірювань, завдяки застосуванню складових елементів з покращеними метрологічними характеристиками;
- 4) зменшення витрат на виробництво, підвищення ремонтпридатності та експлуатаційних характеристик.

2.1.2 Принцип інваріантності (гнучкості) побудови прецизійної приладової системи вимірювання кутів

Принцип інваріантності (гнучкості) успішно застосовуваний при побудові

різних систем у відомих наукових роботах [64, 66, 67] при побудові пропонованої ППСВК проявляється як такий, що певною мірою відтворює її універсальність. Принцип інваріантності вказує на властивість пропонованої ППСВК щодо незмінюваності призначення та здатність відтворювати функціональні можливості у нестационарних виробничих умовах, наприклад, автоматизованих виробництвах приладо- та машинобудування. Принцип інваріантності передбачає універсальність та типовість компонентів пропонованої ППСВК, що функціонують незалежно один від одного, забезпечуючи можливість виконання певних різних функцій кожною підсистемою в межах її призначення. При цьому форми інформаційних потоків повинні бути узгоджені для забезпечення функціональної взаємодії всіх елементів пропонованої ППСВК та збереження її структури відкритою з метою подальшого вдосконалення та доопрацювання у випадку виникнення такої необхідності.

Очікуваними результатами при дотриманні принципу інваріантності (гнучкості) побудови пропонованої ППСВК є розширення функціональних можливостей та покращення експлуатаційних і метрологічних характеристик за рахунок використання сучасної елементної бази, що вводиться до складу пропонованої ППСВК без суттєвої зміни її структури. Особливої користі принцип гнучкості пропонованої ППСВК набуває при експлуатації та модернізації вимірювальних систем.

2.1.3 Принцип автоматизованості прецизійної приладової системи вимірювання кутів

Принцип автоматизації що застосовується до пропонованої ППСВК розглядається виходячи із визначення автоматизації, як такої, що використовує спеціальні технічні засоби та математичні методи з метою звільнення людини від участі в процесах отримання, перетворення, передачі та використання інформації, енергії, матеріалів тощо, або суттєвого зменшення її участі в цих процесах.

За рахунок використання можливостей автоматизації забезпечується оперативна обробка вимірювальної інформації. Людина звільняється від виконання багатоетапних, рутинних та трудомістких процесів обробки інформації, наприклад, при визначенні складових похибок вимірювання,

обчисленні величини вимірюваного кута, оцінці величини випадкової складової похибки вимірювання за результатами багаторазових спостережень тощо).

Принцип автоматизації успішно застосовуваний раніше іншими науковцями [72, 82, 83, 84] при побудові пропонованої ППСВК застосовується з метою підвищення рівня автоматизації власне ППСВК при її функціонуванні. За рахунок використання новітніх нейромережевих методів обробки інформації, а також новітніх розробок у галузі спектроскопії, електроніки та оптики, зокрема фоточутливих матриць, людину звільнено від процесів отримання та обробки вимірювальної інформації. Відповідно, зменшується вплив оператора, і як результат – величина суб'єктивної похибки, яку він вносить при вимірюванні. Очевидно, що точність вимірювання в такому випадку збільшиться. Крім того, застосування принципів автоматизації, забезпечує підвищення швидкодії вимірювань.

Очікуваними результатами від застосування принципів автоматизації є зменшення суб'єктивної похибки, підвищення точності та швидкодії вимірювання кутів.

2.1.4 Принцип ієрархічності побудови прецизійної приладової системи вимірювання кутів

Принцип ієрархічності базується на понятті ієрархія, під яким розуміється впорядкована система абстракцій, наприклад, структурних модулів, підмодулів тощо [72]. Застосування принципу ієрархічності до побудови пропонованої ППСВК спрощує розуміння складних задач за рахунок розбиття її на більш прості, або утворення простих структур, які порівняно легко досліджувати. Принцип ієрархічності успішно застосовувався в роботах [64 – 68, 70, 71, 72, 74, 82 – 85] при побудові різних систем гнучкого прецизійного виробництва, в тому числі вимірювальних системах різного рівня.

Принцип ієрархічності пропонованої ППСВК проявляє себе у формуванні рівнів та підрівнів цілого. При цьому інформаційний або енергетичний вплив, що виникає на одному з рівнів має певне відбиття на інших рівнях через наявність міжрівневих та внутрішніх зв'язків.

Відомо, що будь яка система, в тому числі пропонована ППСВК має багато зв'язків та відношень з різними системними та несистемними утвореннями середовища, в якому вона функціонує. Утворення з якими взаємодіє система

складають середовище системи. Під середовищем системи розуміють об'єкти, явища, процеси навколишнього середовища, що мають необхідний та суттєвий вплив на функціонування та розвиток системи.

За принципом ієрархічності опис пропонованої ППСВК здійснюється в цілому без її розчленування на складові у формі цілого, що взаємодіє з об'єктом вимірювання, та стурбовано з відображенням внутрішніх процесів та зв'язків.

2.1.5. Принцип агрегування (комплексування) прецизійної приладової системи вимірювання кутів

Принцип агрегування, застосовуваний раніше [68, 70, 71, 72, 74, 82] передбачає поділ пропонованої ППСВК на окремі складові, що дозволяє частково зменшити її складність та дозволяє покращити детальне проопрацювання складових системи. Принцип агрегування пропонованої ППСВК дозволяє провести розчленування (декомпозицію) на складові (функціональні елементи). Це дозволяє здійснювати поетапне введення функціональних елементів до складу пропонованої ППСВК. При реалізації цього принципу необхідно дотримуватись сумісності функціональних можливостей окремих елементів пропонованої ППСВК. Крім того, агрегування дозволяє забезпечувати гнучкість системи, що відображається у можливості її перебудови (переналагодженні) в залежності від динамічних вимог навколишнього або виробничого середовища.

Принцип агрегування виражається у представленні пропонованої ППСВК як сукупності агрегатів, вузлів, функціональних елементів, що мають широке застосування та випускаються промисловістю. Такими елементами, наприклад, є фоточутлива матриця (наприклад, OV16880 або OV20880 виробництва OmniVision, США), кільцевий лазер, розроблений в КП СІБ “Арсенал” за участю кафедри приладобудування Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” тощо.

Дотримання цих принципів дозволяє забезпечувати взаємозамінність складових пропонованої ППСВК, а також є важливою передумовою щодо підвищення економічності та швидкості виробництва, подовження терміну експлуатації та зменшення часу на ремонт та обслуговування.

Застосування принципу агрегування при побудові пропонованої ППСВК передбачає врахування наступних аспектів:

- 1) пропонується ППСВК розглядається, як цілісний об'єкт, якому властива множина певних метрологічних та технічних показників;
- 2) складові пропонованої ППСВК розглядаються, як окремі (автономні) елементи, що володіють взаємозамінністю і функціональною сумісністю (конструктивною, інформаційною тощо).

2.1.6. Принцип структурованості прецизійної приладової системи вимірювання кутів

Принцип структурованості, що застосовується до побудови пропонованої ППСВК описаний в літературі [72]. Він означає, що пропонована ППСВК як об'єкт проектування складається з певних структурних елементів, що в певній методологічній послідовності активно використовуються в процесі побудови / проектування із прийняттям відповідних кінцевих рішень.

2.1.7. Принцип системності прецизійної приладової системи вимірювання кутів

Принцип системності описаний в літературі [72] і може бути інтерпретований до побудови пропонованої ППСВК. Відповідно до поданого в літературі [72] принцип системності проявляється у системному підході щодо дій (аналіз, синтез, проектування) будь якого процесу та явища: програмування, технологічної діагностики, аналізу, синтезу, побудови / проектування приладових систем, технологій вимірювання та систем управління ними.

Загалом принцип системності полягає в тому, що пропонована ППСВК розглядається як система, що являє собою організовану сукупність елементів, які функціонально взаємодіють між собою. При чому, функціональна взаємодія між елементами пропонованої ППСВК базується на принципах абстрагування, структурованості, ієрархічності та ін.

Основна увага при побудові пропонованої ППСВК за принципом системності приділяється формуванню структури ППСВК в цілому та її складових окремо, характерних зв'язків, дослідженню властивостей елементів, що проявляються при функціональних взаємодіях та взаємозв'язках.

Принцип системності покладено в основу побудови *системної моделі* пропонованої ППСВК (див. далі п. 2.2).

2.1.8. Принцип цілісності прецизійної приладової системи вимірювання кутів

Принцип цілісності дозволяє розглядати пропоновану ППСВК в єдності її взаємодіючих складових. При чому властивості окремих складових пропонованої ППСВК не можуть бути об'єднані простим додаванням для формування властивостей пропонованої ППСВК в цілому.

Принцип цілісності пропонованої ППСВК проявляється у здатності зберігати свої властивості та характеристики у визначених межах норми в нестационарних умовах під дією збурюючі впливів. Цілісність пропонованої ППСВК проявляється за рахунок міцних внутрішніх функціональних зв'язків між складовими та є основою для проявів принципу самостійності (автономності, незалежності) системи.

2.1.9. Принцип емерджентності прецизійної приладової системи вимірювання кутів

Принцип емерджентності можна інтерпретувати, як виникнення нового цілого (другий принцип кібернетики за Р. Ешбі) [72], тому, що емерджентність (від англ. *emergent* – той, що з'являється, не очікувано виникає).

Джерелом емерджентних властивостей виступає структура системи. Так при різних структурах системи, утворених з одних і тих же елементів, виникають різні властивості. З даної позиції принцип емерджентності підкреслює можливість неспівпадіння окремих локальних процесів, функцій, властивостей з глобальною функцією пропонованої ППСВК.

Принцип емерджентності є наслідком принципу цілісності. З цих позицій пропонована ППСВК виступає як ціле тому, що є носієм емерджентності. Так основні функції системи – високоточне вимірювання кутів з швидкодією – проявлятимуться тільки у випадку функціональної взаємодії всіх її елементів разом у певній послідовності. Тобто, жодна із частин пропонованої ППСВК самостійно не забезпечує виконання високоточних вимірювань з швидкодією.

Принцип емерджентності, як більш розвинена форма закону діалектики про перехід кількості в якість [73], проявляється виникненням у пропонованої ППСВК нових властивостей (окрім очікуваного підвищення точності та швидкодії у

розширенні функціональних можливостей) при введенні в її структуру нових елементів (штучних нейронних мереж (ШНМ) та фоточутливої матриці).

2.1.10. Принцип декомпозиції та композиції прецизійної приладової системи вимірювання кутів

Принцип декомпозиції та композиції є розвитком принципів модульності, структурованості, системності та цілісності. Принцип декомпозиції, що використовується при побудові пропонованої ППСВК є загально відомим у автоматизованому машинобудуванні. Так, наприклад, при автоматизованому виборі технологічного обладнання при проектуванні гнучких виробничих систем (наприклад, пристроїв орієнтування) він проявляється у групуванні та функціональному узгодженні пристроїв орієнтування та об'єктів виробництва [3].

У приладобудуванні при побудові пропонованої ППСВК проявом принципу декомпозиції та композиції є можливість розділяти та/або об'єднувати за функціональним призначенням окремі складові пропонованої ППСВК, з виконанням відповідних функцій, наприклад, сприйняття первинного аналогового сигналу, перетворення сигналу у цифрову форму, фільтрації сигналу, виділення окремо корисної складової та похибки, зменшення величини похибки, представлення результатів користувачу у зручній формі.

2.1.11. Принцип результативності (завершеності) прецизійної приладової системи вимірювання кутів

Принцип результативності полягає в отриманні при побудові пропонованої ППСВК кінцевого результату. Особливість постановки задач наукової проблеми побудови ППСВК дозволяє стверджувати, що завжди існує функція яка відображає процес перетворення вхідних інформаційних та енергетичних потоків (сигналів) у відповідні вихідні потоки (сигнали). Кількісна складова функції повинна вказувати на досягнення результату. В іншому випадку з врахуванням принципів декомпозиції та композиції, системності, модульності, інваріантності (гнучкості), автоматизованості, ієрархічності та агрегування здійснюється коригування або зміна початкових, проміжних та ін. даних і виконується повтор розрахунків. Таким чином, принцип результативності повинен виконуватись цілеспрямовано до отримання бажаного результату, що описується виразом (2.1) [72].

2.1.12. Принцип синергетичної інтеграції прецизійної приладової системи вимірювання кутів

Синергія, синергетизм – це сукупна, взаємозалежна дія декількох впливів, сил, факторів в одному напрямку. Принцип синергетичної інтеграції є більш розвиненою формою емерджентності. Дотримання принципу синергетичної інтеграції при побудові пропонованої ППСВК дозволяє отримати більший ефект від взаємодії функцій складових системи, ніж при індивідуальному (окремому) функціонуванні цих складових. Дотримання принципів синергетичної інтеграції при побудові пропонованої ППСВК передбачає сприйняття складових системи, як синергетично (функціонально) взаємодіючих частин, що утворюють ціле, та отримати можливо принципову нову властивість, що розширює її функціональні можливості.

Ефективність функціонування пропонованої ППСВК залежить від багатьох внутрішніх та зовнішніх факторів. Відповідно до властивостей емерджентності сукупна взаємодія декількох факторів, як правило, завжди відрізняється від суми відокремлених ефектів. Кількісною оцінкою емерджентності є отриманий ефект від синергетизму. Основний закон синергії полягає в тому, що ефективність функціонування будь якої складної системи, в тому числі пропонованої ППСВК обумовлюється її цілісністю. Таким чином, максимальний ефект від функціонування пропонованої ППСВК можна отримати шляхом сукупного використання її складових.

2.2. Побудова системної моделі прецизійної приладової системи вимірювання кутів

Системні моделі є сучасним ядром наукового моделювання [1, 2, 3]. Та є одними із типів моделей, які синтезуються на базі фізичних законів та гіпотез про те, як система структурована, і як вона функціонуватиме. При побудові системної моделі пропонованої ППСВК використано різні способи її абстрактного (тобто уявного) опису [1], зокрема використано *структурний* та *інформаційний* рівні з побудовою структурної схеми та інформаційної моделі пропонованої ППСВК (див. рис. 2.1).

2.2.1. Структурна модель прецизійної приладової системи вимірювання кутів

Структурна схема – це модель пропонованої ППСВК, що описує функціональні взаємозв'язки елементів системи та визначає її склад в цілому. Структурна модель дозволяє визначити склад функціонально сумісних технічних засобів та елементів для вимірювання кутів та експрес-обробки (в режимі реального часу) інформації в автоматизованому режимі.

Як відомо із літератури [9] структура будь-якої системи, в тому числі пропонованої ППСВК, може бути попередньо визначена та містити наступні складові елементи: прилади вимірювання параметрів (первинні перетворювачі, датчики); пристрої перетворення (обробки) інформації (наприклад, підсилювачі, фільтри, аналого-цифрові перетворювачі); пристрої зв'язку або передачі інформації (наприклад, канали зв'язку); пристрої зберігання та відображення інформації. Структурна схема пропонованої ППСВК побудована з дотриманням раніше описаних принципів та системного підходу щодо фізичної організації. Структурна схема пропонованої ППСВК може бути представлена, як деяка багаторівнева сукупність різних технічних засобів з неоднорідними властивостями (рис. 2.4) [17].

Нижній рівень пропонованої ППСВК (*0-level*) являє собою рівень формування вхідного вимірювального сигналу α_{in}^A . Даний рівень організований у вигляді *підсистеми прецизійного вимірювання кута (ПВК) / subsystem of the angle high-precision measuring (SAM)*, базовим елементом якої є високоточний лазерний гоніометр (рис. 2.6), що містить привод 1 обертання, предметний стіл 2, обертовий пристрій 3, кільцевий лазер 4, автоколіматор 5 і лазерним випромінювачем 6, фото чутливу КМОП (CMOS)-матрицю 7, блок 8 живлення. Привод 1 обертання, механічно з'єднаний з предметним столом 2, що встановлений на обертовому пристрої 3. На ньому жорстко закріплені кільцевий лазер 4 і автоколіматор 5 з лазерним випромінювачем 6, КМОП-матриця 7 для реєстрації випромінювання в інфрачервоному та ультрафіолетовому діапазоні, які підключені до блоку 8 живлення.

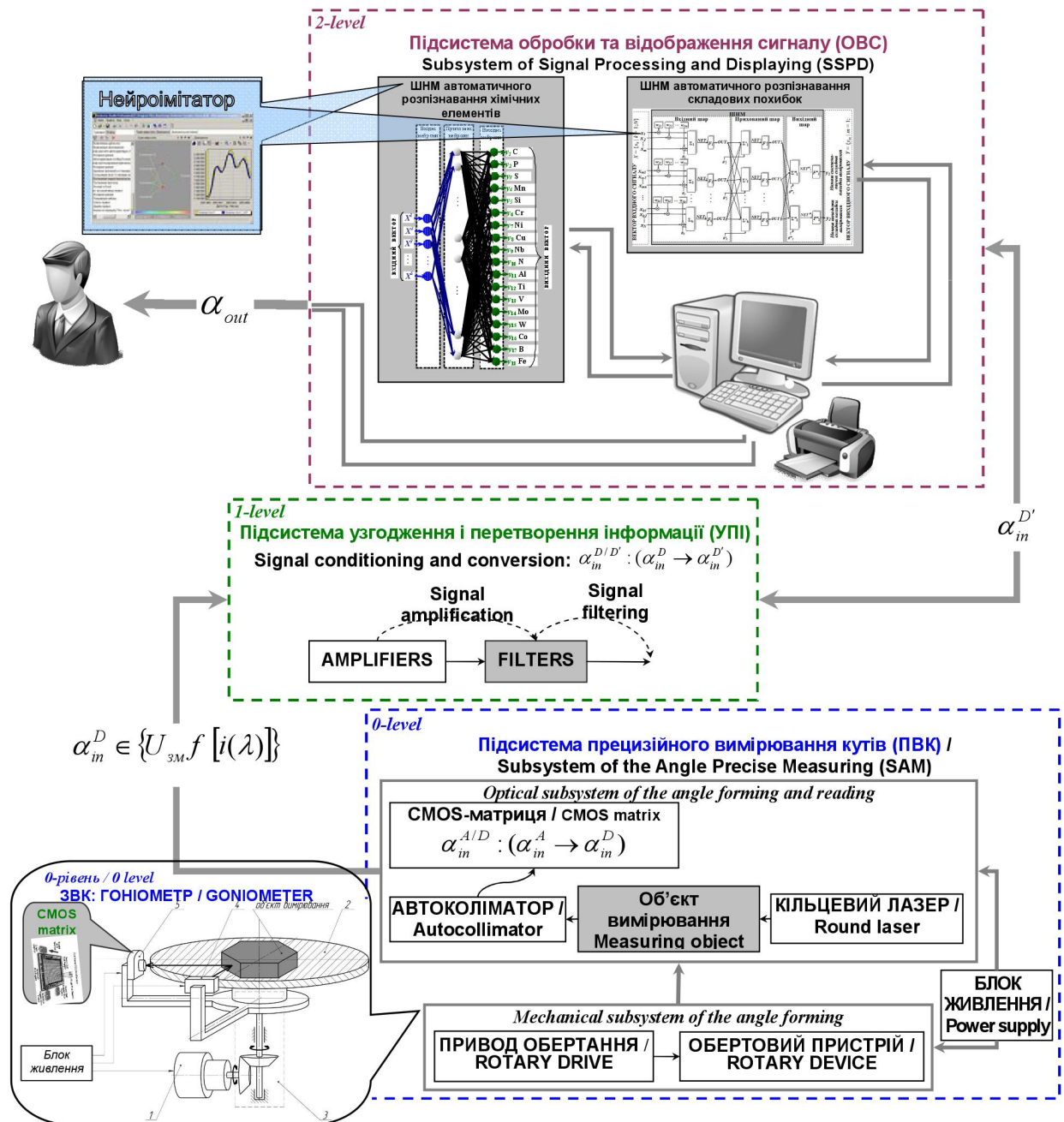


Рис. 2.4. Структурна схема пропонованої ППСВК [17]

При вимірюванні кутів, на виході автоколіматора 5 отримують потік фотонів, які сприймає КМОП-матриця 7 і перетворює їх на множину цифрових сигналів. Таким чином на виході ПВК формується цифровий сигнал $\alpha_{in}^D \in \{U_{zm} f[i(\lambda)]\}$, де α_{in}^D – цифровий сигнал ПВК, U_{zm} – напруга на виході КМОП-матриці, отримана з фоточутливих елементів (пікселів), $i(\lambda)$ – струм насичення фоточутливих елементів КМОП-матриці.

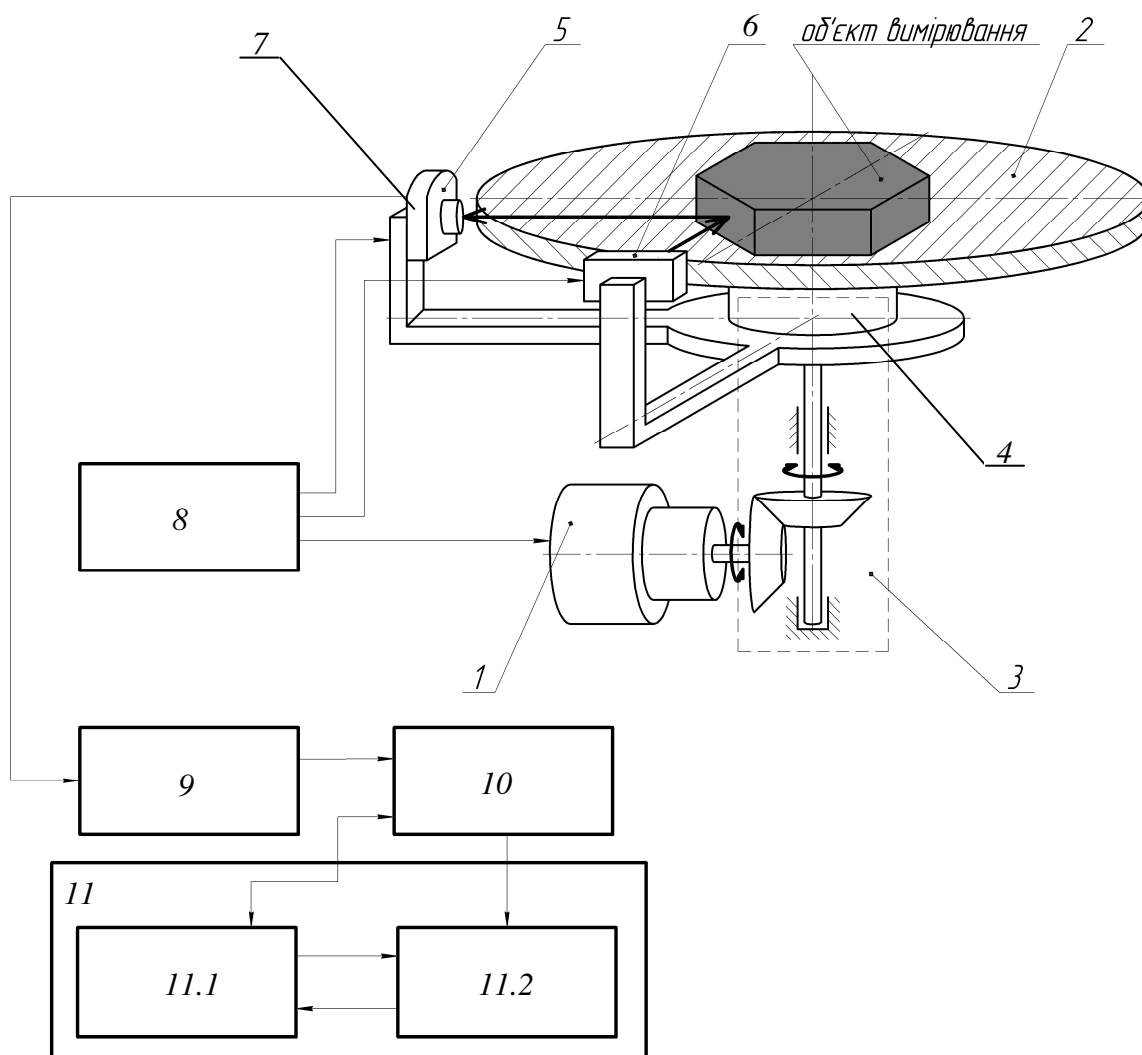


Рис. 2.5. Блок-схема пропонованої ППСВК [17, 18]

При застосуванні пропонованої ППСВК додатково для проведення аналізу інтенсивностей спектрального розподілу для визначення хімічного складу металовмісних матеріалів, лазерний випромінювач 6 використовується в якості джерела потужного енергетичного імпульсу, що короткочасно опромінює ОВ – металевий зразок. ОВ в залежності від хімічного складу формує відповідний спектр випромінювання (наприклад, рис. 2.6) різної інтенсивності. Із літератури [75] відомо, що у інфрачервоному оптичному діапазоні та області видимого спектру метали сильно відбивають випромінювання, що пояснюється переважним розсіюванням світла при його взаємодії з вільними електронами, концентрація яких у металах становить 10^{22} - 10^{23} см⁻³. Електрони випромінюють в процесі розсіювання так звані вторинні хвилі. Поглинання квантів світла безпосередньо електронами можливе тільки при їх одночасних зіткненнях з фотонами, домішками хімічних елементів, один з одним тощо.

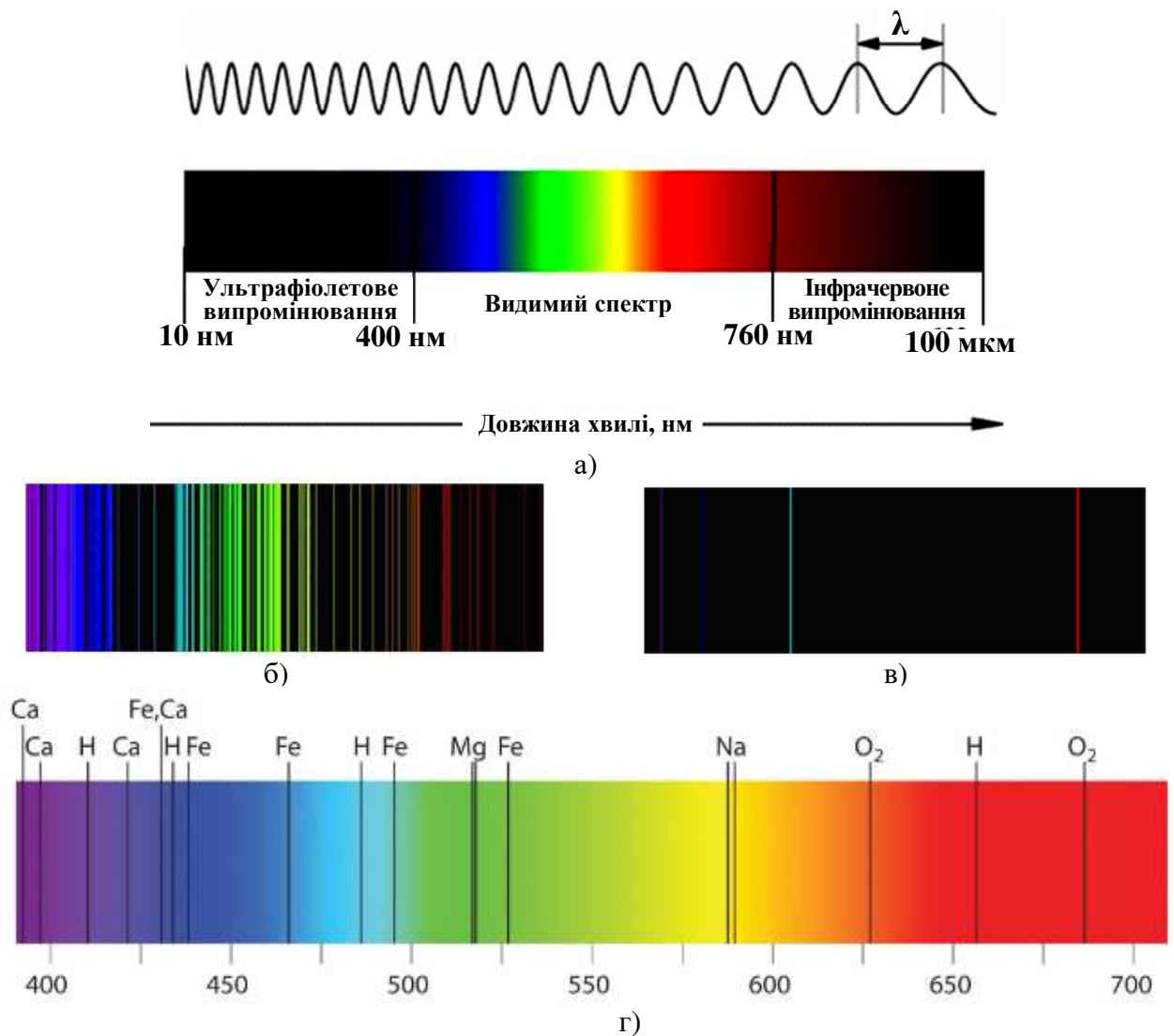


Рис. 2.6. Спектр оптичного випромінювання:

а) діапазон оптичного випромінювання, б) заліза, в) гелію, г) збуджених ударами електронів атомів різних хімічних елементів

Варто відмітити, що відбиті та поглинені хвилі лазерного випромінювання формуються не на поверхні металевого ОВ, а в речовині, у так званому приповерхневому шарі, в якому затухає випромінювання, що проникає в метал.

Сформований світловий потік проектується від оптичної системи 5 на блок 6 матриць, що перетворює його на відповідний електричний сигнал. Різні хімічні елементи, що можуть міститися в ОВ, поглинають енергетичний імпульс від лазера 6 з різною інтенсивністю, та формують різні світлові потоки, що відбиваються під різними кутами та відповідно проектується на різні позиції матриць блоку 6 матриць. Відомо [75], що поглинаюча здатність металів практично не залежить від частоти падаючого лазерного випромінювання і

визначається тільки електричними властивостями матеріалів, що залежать від хімічного складу.

Наступний рівень пропонованої ППСВК *1-рівень / 1-level узгодження і перетворення сигналу*. Даний рівень представлений підсистемою *узгодження і перетворення інформації (VIII) / Signal conditioning and conversion (SCC)*. На даному рівні здійснюється попередня обробка цифрових сигналів α_{in}^D від ПВК, тобто підсилення та фільтрація сигналів для їх коректної обробки пропонованими ШНМ. Базовим елементом *1-го рівня / 1-level* пропонованої ППСВК є блок 9 узгодження і перетворення інформації (*information matching and transformation unit*) (рис. 2.4, рис. 2.5), який реалізує функцію $\alpha_{in}^{D/D} : (\alpha_{in}^D \rightarrow \alpha_{in}^{D'})$ [17].

З *1-рівня / 1-level* множина вимірювальних даних у цифровій формі $\alpha_{in}^{D'}$ передається на *2-level – обробки та відображення сигналу / signal processing and display*. Даний рівень представлений пропованою підсистемою *обробки та відображення сигналу (OBC) / subsystem of signal processing and displaying (SSPD)*. Базовими елементами *2-level* пропонованої ППСВК є ШНМ автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання та ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів (блок 10 на рис. 2.5), що можуть бути реалізовані нейропроцесором та спряжені з комп'ютером, або нейроімітатором та інтегровані в комп'ютерну операційну систему, як спеціалізований програмний додаток. Пропонована ШНМ автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання здійснює експрес-аналіз складових похибок вимірювання за принципом декомпозиції в автоматичному режимі та використовується на етапі аналізу та обробки вимірювальної інформації. Пропонована ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів здійснює експрес-аналізу інтенсивностей спектрального розподілу хімічних речовин для визначення хімічного складу металовмісних матеріалів. Електричний сигнал від КМОП-матриці 6 через блок 7 керування передається до пропонованої ШНМ, яка визначає хімічний склад досліджуваного ОБ. Крім того, підсистема ПВС містить персональний комп'ютер (ПК) або може містити ЕОМ 11, в якій в режимі реального часу у відповідному програмному модулі (блок 11.1 на рис. 2.5) здійснюється аналіз і обробка результатів від пропонованих ШНМ та прийняття рішень, а також автоматизована обробка вимірювальної інформації, зокрема,

нормування складових похибок вимірювання за відомими методами, з представленням результатів у зручній для користувача формі (табличній та / або графічній) через інтерфейс 11.2 користувача (див. рис. 2.5) [17, 18, 19].

Пропонована ППСВК дозволяє в автоматизованому режимі проводити безконтактні високоточні вимірювання для попередньої виставки НЧЕ, плоских кутів та пірамідальності призм, а також інших об'єктів виробництва, показника заломлення оптичного скла з обробкою вимірювальної інформації в режимі реального часу. Крім того пропонована ППСВК дозволяє проводити аналіз інтенсивностей спектрального розподілу для визначення хімічного складу металовмісних матеріалів.

Варто відмітити, що на сьогодні перелік сучасних засобів для визначення хімічного складу металовмісних речовин, є досить значним. Існує декілька типів приладів, що дозволяють визначати наявність тих чи інших хімічних елементів у складі металів методами рентгенографічної спектроскопії – рентгенографічні оптичні прилади, та лазерної спектроскопії – лазерні оптичні прилади. Переваги останніх очевидні. За даними літератури [76, 77, 78] прилади, що застосовують метод лазерної спектроскопії є більш точними, безпечними у використанні, володіють здатністю виявлення майже всіх хімічних елементів.

Проте, аналіз принципів побудови та роботи сучасних спектрометрів дозволяє констатувати, що всі вони мають різні діапазони вимірювання, точність, та швидкодію, а також базуються на застосуванні різних складних математичних моделей, методів, та алгоритмів обробки інформації, наприклад, багатовимірною аналізу методом найменших квадратів [79], розрахунків багатомірної регресії в ортогональних поліномах Чебишева, які перетворюються в алгебраїчні поліноми [80] тощо. Тому проблема якісного та кількісного визначення хімічних елементів у металах в режимі реального часу залишається невирішеною.

2.2.2. Інформаційна модель прецизійної приладової системи вимірювання кутів

Інформаційна модель функціонування пропонованої ППСВК описує зміст та структуру інформаційних потоків та зв'язків між її компонентами. Вона представлена на рис. 2.7 як орієнтований орг-граф, вершинами якого є функціональні складові пропонованої ППСВК, а ребрами – інформаційні та енергетичні потоки, які відбуваються при функціонуванні ППСВК і відображають

принципи її роботи.

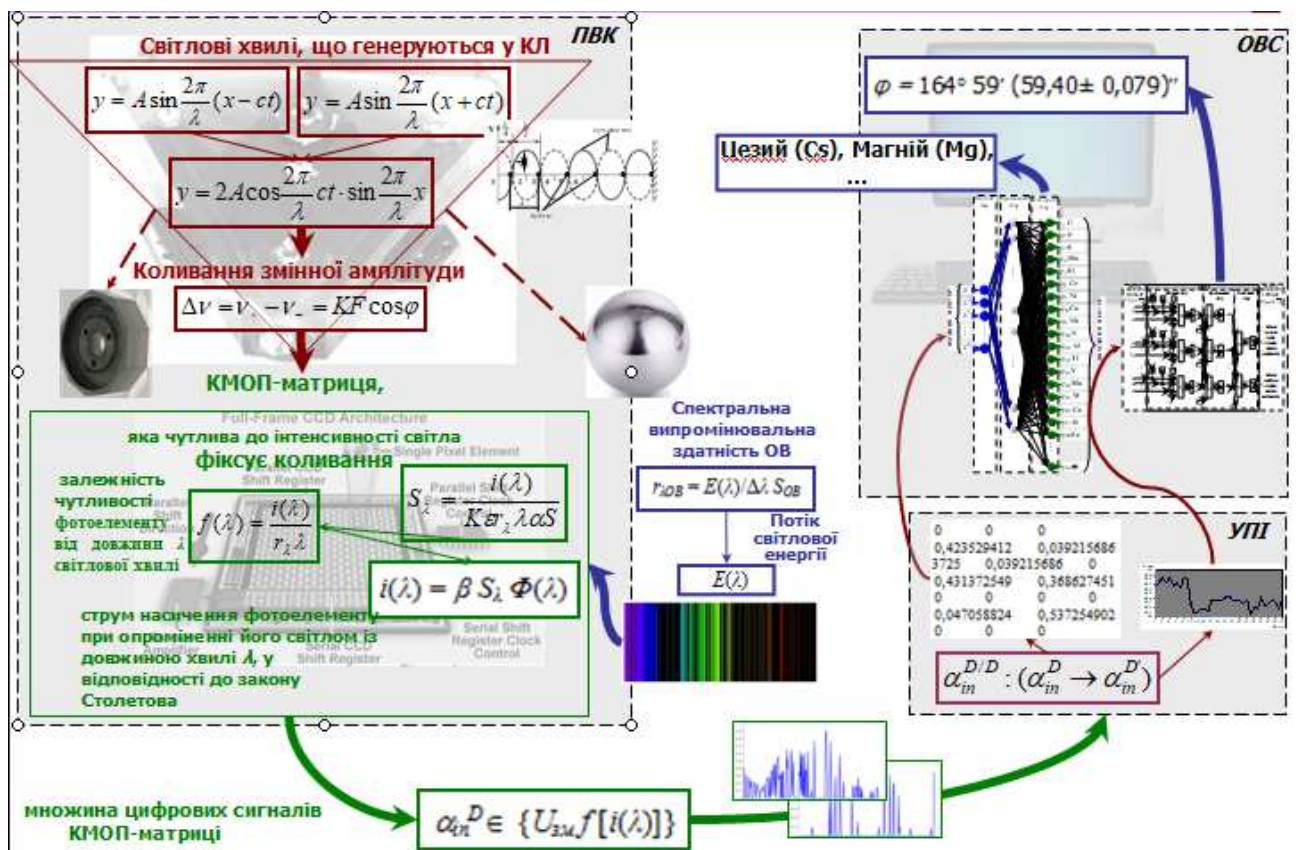


Рис. 2.7. Схема інформаційної моделі функціонування пропонованої ППСВК

При функціонуванні пропонованої ППСВК, зокрема при обертанні обертового пристрою з об'єктом вимірювання на виході автоколіматора, отримують потік фотонів, що потрапляє на світлочутливі елементи КМОП-матриці, яка формує відповідну множину цифрових сигналів $\alpha_{in}^D \in \{U_{3M} f[i(\lambda)]\}$.

В залежності від величини вимірюваного плоского кута φ та оптичних показників матеріалу ОВ світловий промінь лазера через оптичну систему автоколіматора 5 проектується з різною інтенсивністю на відповідні позиції (фотоелементи) КМОП-матриці 7, яка перетворює його на відповідний електричний сигнал. Електричний сигнал від КМОП-матриці 7 через блок 9 узгодження передається на відповідну ШІМ 10 а з неї до ПК 11, в якій здійснюється автоматизована обробка вимірювальної інформації.

При опроміненні світлом фотоелектронних напівпровідникових елементів КМОП-матриці в них відбувається зміна внутрішнього стану. Зокрема спостерігається збільшення електропровідності пропорційно інтенсивності світлового потоку. Чутливість S_λ фотоелементів КМОП-матриці 7 залежить від

довжини світлової хвилі λ та визначається за відомою формулою:

$$S_{\lambda} = \frac{i(\lambda)}{K \varepsilon r_{\lambda} \lambda \alpha S}, \quad (2.2)$$

де S_{λ} – чутливість фотоелектронного напівпровідникового елементу;

$i(\lambda)$ – струм насичення фотоеlementу;

K, ε – коефіцієнти пропорційності;

r_{λ} – спектральна випромінювальна здатність фотоеlementу;

λ – довжина світлової хвилі;

α – спектральна поглинаюча здатність матеріалу.

Функція $f(\lambda)$ залежності чутливості S_{λ} фотоеlementу від довжини λ світлової хвилі представляється виразом:

$$f(\lambda) = \frac{i(\lambda)}{r_{\lambda} \lambda}, \quad (2.3)$$

де $i(\lambda)$ – струм насичення фотоеlementу при опроміненні його світлом із довжиною хвилі λ , у відповідності до закону Столетова описується виразом (2.4):

$$i(\lambda) = \beta S_{\lambda} \Phi(\lambda), \quad (2.4)$$

де S_{λ} – чутливість фотоеlementу на довжині хвилі λ ;

$\Phi(\lambda)$ – світловий потік, що попадає на фотоеlement;

β – коефіцієнт пропорційності.

З врахуванням того, що світловий потік $\Phi(\lambda)$ являє собою частину потоку світлової енергії $E(\lambda)$, яку відбиває ОВ опромінений світловим імпульсом від лазера 6 на довжині хвилі λ в інтервалі хвиль $\Delta\lambda$, можна вважати, що:

$$\Phi(\lambda) = K E(\lambda), \quad (2.5)$$

де K – коефіцієнт пропорційності.

$E(\lambda)$ – потік світлової енергії випромінюваний ОВ, що визначається за виразом (2.6):

$$E(\lambda) = r_{\lambda OV} \Delta\lambda S_{OV}, \quad (2.6)$$

де $r_{\lambda OV}$ – спектральна випромінювальна здатність ОВ опроміненого світловим імпульсом лазера на довжині хвилі λ в інтервалі $\Delta\lambda$

довжин хвиль, що визначається смугою пропускання світлофільтрів оптичної системи автоколіматора 5 та КМОП-матриці 7 запропонованої ППСВК;

S_{OB} – площа поверхні ОВ, що опромінюється;

$\Delta\lambda$ – інтервал довжин хвиль, що визначається смугою пропускання світлофільтрів оптичної системи автоколіматора 5 та КМОП-матриці 7 ППСВК: $\Delta\lambda = \varepsilon \lambda$, де ε – коефіцієнт пропорційності.

Спектральна випромінювальна здатність ОВ $r_{\lambda OB}$ підпорядковується закону Планка, що описує спектральну густину потужності випромінювання абсолютно чорного тіла наступним чином:

$$U(\omega; T) = \frac{\omega^2}{\pi^2 C^3} \cdot \frac{h\omega}{e^{\frac{h\omega}{kT}} - 1}, \quad (2.7)$$

де h – постійна Планка, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с;

k – постійна Больцмана, $k = 1,380\,648\,52(79) \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹.

Спектральна випромінювальна здатність ОВ $r_{\lambda OB}$ буде залежати від випромінювальних здатностей $r'_{\lambda OB}$ хімічних елементів, що містяться в ньому $r_{\lambda OB} = f(r'_{\lambda OB})$. Величина випромінювальної здатності $r'_{\lambda OB}$ i -го хімічного елементу відповідно до спектральної випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла за законом Планка та формулою (2.9) може бути знайдена із наступного виразу:

$$r'_{\lambda OB} = r_{\lambda} \alpha_i, \quad (2.8)$$

де α_i – спектральна поглинаюча здатність i -го хімічного елементу, що міститься в ОВ.

Спектральне випромінювання абсолютно чорного тіла за формулою Планка:

$$r_{\lambda} = 2\pi h c^2 \frac{\lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1}, \quad (2.9)$$

де h – постійна Планка;

c – швидкість світла в вакуумі, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с;

k – постійна Больцмана;

T – температура за абсолютною шкалою.

Таким чином КМОП-матриця 7 формує електричні сигнали відповідно до

спектрального складу випромінювання ОВ, що залежить від вимірюваного кута та обумовлюється оптичними показниками матеріалу ОВ, які залежать від наявності відповідних хімічних елементів у матеріалі. У табл. 2.1 наведені оптичні постійні деяких металів при кімнатній температурі у видимому та інфрачервоному спектрі.

Таблиця 2.1

Оптичні постійні деяких металів [21]

Умовне позначення металу	$\lambda = 0,5$ мкм			$\lambda = 5,0$ мкм		
	показник переломлення світлової хвилі, n	показник згасання, k_p	коефіцієнт відбиття $R, \%$	показник переломлення світлової хвилі, n	показник згасання, k_p	коефіцієнт відбиття $R, \%$
Cu	1,06	2,70	63,2	3,1	32,8	98,9
Ag	0,11	2,94	95,5	2,4	34,2	99,2
Au	0,50	2,04	68,8	3,3	35,2	98,95
Zn	—	—	—	3,8	26,2	97,9
Al	0,50	4,59	91,4	6,7	37,6	98,2
In	—	—	—	9,8	32,2	96,6
Sn	0,78	3,58	80,5	8,5	28,5	96,2
Pb	1,70	3,30	62,6	9,0	24,8	95,0
Ti	2,10	2,82	52,5	3,4	9,4	87,4
Nb	2,13	3,07	56,0	8,0	27,7	96,2
V	2,65	3,33	56,6	6,6	17,5	92,7
Mo	3,15	3,73	59,5	4,25	23,9	97,2
W	3,33	2,96	51,6	3,48	21,2	97,0
Fe	1,46	3,17	63,7	4,2	12,5	90,8
Co	1,56	3,43	65,9	4,3	14,6	92,9
Ni	1,54	3,10	61,6	4,95	18,5	94,8
Pt	1,76	3,59	65,7	7,7	20,2	93,7

КМОП-матриця 7 побудована таким чином, що струм $i(\lambda)$ насичення фотоелементів перетворюється в напругу U_{zm} безпосередньо на пікселі матриці, тобто відбувається реалізація функції $\alpha_{in}^{A/D} : (\alpha_{in}^A \rightarrow \alpha_{in}^{D'})$ перетворення аналогових сигналів $\alpha_{in}^A \in \{i(\lambda)\}$ в цифровий код $\alpha_{in}^D \in \{U_{zm} f[i(\lambda)]\}$. Вихідний вимірювальний сигнал $\alpha_{in}^D \in \{U_{zm} f[i(\lambda)]\}$, що являє собою цифровий код реалізований у вигляді множини електричних імпульсів – напруг U_{zm} змінного значення в залежності від величини струму $i(\lambda)$ насичення фотоелементів, що подаються до блоку 9 узгодження і перетворення інформації. В блоці 9 узгодження і перетворення інформації сигнали фільтруються $\alpha_{in}^{D/D'} : (\alpha_{in}^D \rightarrow \alpha_{in}^{D'})$ і передаються у підсистему ОВС, зокрема у ПК та пропонованій ШНМ у вигляді множини чисел $\alpha_{in}^{D'} \subset \{N_i | i = \overline{1; n}\}$, яка отримується за один повний оберт обертового пристрою 3:

$$N = \{N_i, | i = \overline{1, n} \};$$

$$N_i = N_{i-2} + \int_{t_i}^{t_{i+1}} f_{Gout}(t) dt, \quad (2.10)$$

де i – порядковий номер числа, що відповідає порядковому номеру грані призми;

n – кількість граней призми;

t_i – час надходження імпульсів до автоколіматора від i -ої грані призми,

$t_1, t_2, t_3, \dots, t_{n+1}$ – час надходження імпульсів до автоколіматора від 1, 2,

3, $n+1$ грані призми відповідно;

f_{Gout} – частота сигналів α_{in}^D від гоніометра.

Таким чином, цифровий сигнал $\alpha_{in}^{D'}$, що передається до ПК та ШНМ являє собою множину:

$$\alpha_{in}^D \subset \{ N_1 = \int_{t_1}^{t_2} f_{out}(t) dt, N_2 = \int_{t_2}^{t_3} f_{out}(t) dt, N_3 = N_1 + \int_{t_3}^{t_4} f_{out}(t) dt, \\ N_4 = N_2 + \int_{t_4}^{t_5} f_{out}(t) dt, N_{n-1} = N_{n-3} + \int_{t_{n-1}}^{t_n} f_{out}(t) dt, \\ N_n = N_{n-2} + \int_{t_n}^{t_{n+1}} f_{out}(t) dt \}.$$
(2.11)

Величина вимірюного i -го кута φ_i автоматизовано обчислюється в ПК (або ЕОМ) за виразом:

$$\varphi_i = 2\pi \frac{N_{i-1} + N_i}{N_{n-1} + N_n} = 2\pi \frac{N_\varphi}{N_{2\pi}}$$

$$N_{i-1} = 0 \text{ при } i = 1,$$
(2.12)

де φ_i – вимірне значення кута;

i – порядковий номер вимірюваного кута.

N_i – множина чисел, що отримується від гоніометра за один повний оберт обертового пристрою 3.

Істинне значення φ_0 вимірюваного кута в ЕОМ розраховується за теоремою про суму кутів правильного багатокутника:

$$\varphi_0 = \pi \frac{(n-2)}{n}, \quad (2.13)$$

де φ_0 – істинне значення вимірюваного кута;

n – кількість кутів об'єкту вимірювання.

Також в ПК (або ЕОМ) здійснюється автоматизоване обчислення похибки за відповідними методиками. Для цього в пропонованій ШНМ здійснюється попередня обробка вимірювальної інформації з метою визначення випадкової та систематичної складових похибок вимірювання [17, 18]. Так в пропонованій ШНМ здійснюється перетворення вхідної інформації представленій у вигляді так званих вхідних векторів $X = \{x_1, \dots, x_k\}$ у вихідний сигнал OUT , що представляється так званим вихідним вектором $Y = \{y_1, \dots, y_m\}$. При чому вхідний вектор X автоматично формується із множини цифрових сигналів $\alpha_{in}^{D'}$:

$$X = \{x_1, \dots, x_k\} \Leftrightarrow \alpha_{in}^{D'} \subset \{N_i \mid i=\overline{1;n}\}, \quad (2.14)$$

де \Leftrightarrow – символ рівнозначності лівої та правої частини вище наведеного виразу.

Конкретний вид перетворення даних, що виконується ШНМ визначається характеристиками штучних нейронів та особливостями її архітектури, тобто визначеними підмножинами вхідних, вихідних та прихованих нейронів, кількість яких залежить від структури векторів вхідного $X = \{x_1, \dots, x_k\}$ та вихідного $Y = \{y_1, \dots, y_m\}$ сигналів. Тому при проведенні кутових вимірювань інформація повинна подаватися на вхід ШНМ тільки у цифровій формі. Причому розмірність вхідного вектора ШНМ $X = \{x_1, \dots, x_k\}$ буде обумовлюватись необхідною кількістю вимірювань.

2.2.3. Декомпозиція організаційної моделі прецизійної приладової системи вимірювання кутів

2.2.3.1. Датчик кута прецизійної приладової системи вимірювання кутів

До складу пропонованої ППСВК входить спеціальний технічний пристрій, що перетворюватиме вимірювальну механічну величину – величину плоского кута у зручну для подальшої передачі, обробки, зберігання та сприйняття форму. Для позначення цього технічного пристрою у різних областях техніки багатьма авторами використовуються різні терміни [9, 20, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30,

31, 32] – чутливий елемент, детектор, датчик, приймач, зонд або вимірювальна головка, сенсор, первинний перетворювач, вимірювальний перетворювач. Тому залишаючи осторонь деякі лінгвістичні та семантичні тонкощі, а також очевидні неточності й суперечності у відомих визначеннях, можна відзначити, що поняття сенсор, датчик, чутливий елемент, первинний вимірювальний перетворювач, детектор в цілому рівнозначні та взаємозамінні [20, 31]. Враховуючи приведені автором в роботі приймається для використання термін *датчик*.

У високоточних кутовимірювальних засобах в якості датчиків кута використовуються ємнісні або індуктивні перетворювачі кута, фотоелектричні перетворювачі, штрихові лімби та кільцеві лазери.

Принцип дії *ємнісних датчиків кута* заснований на зміні геометрії конденсатора або на зміні діелектричних властивостей середовища, розташованого між його обкладинками. На практиці при вимірюванні переміщення електропровідного ОБ, його поверхня часто виступає як пластина конденсатора. На рис. 2.8 схематично зображено однополярний ємнісний датчик, в якому одна з пластин конденсатора з'єднана з центральним провідником за допомогою коаксіального кабелю, а іншою пластиною є сам об'єкт вимірювання. Необхідно відзначити, що власна пластина датчика оточується заземленим екраном, що дозволяє покращувати лінійність і зменшувати крайові ефекти. Типовий ємнісний датчик працює на частотах 3-МГц діапазону і може визначати значення кута об'єкту вимірювання, які швидко рухаються. Частотні характеристики такого датчика з вбудованим електронним інтерфейсом знаходяться в діапазоні 40 кГц. Ємнісні датчики дуже ефективні при роботі з струмопровідними об'єктами, при цьому вони вимірюють ємність між електродом і самим об'єктом. Ємнісні датчики також досить добре працюють і з струмонепровідними об'єктами, але при цьому їх точність дещо погіршується. Будь-який об'єкт вимірювання, що потрапляє в коло електрода, володіє власними діелектричними властивостями, які змінюють ємність між електродом і корпусом датчика, що, в свою чергу, призводить до появи вихідного сигналу, пропорційного відстані між об'єктом і датчиком [32].

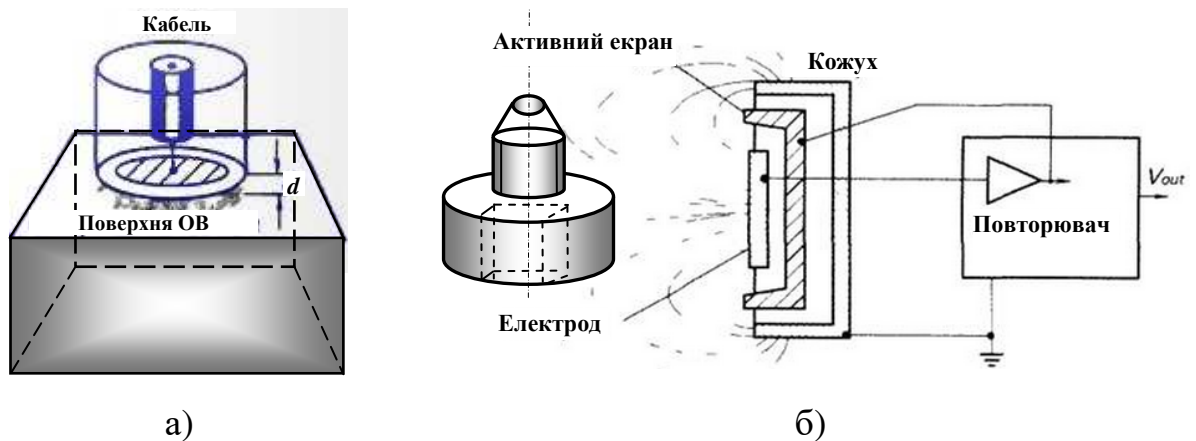


Рис. 2.8. Ємнісний датчик а) з екрануючим кільцем, поперечний переріз [32];
б) з активним екраном навколо електрода [33]

До недоліків ємнісних датчиків слід віднести [34, 35] порівняно невеликий коефіцієнт передачі (перетворення); високі вимоги до екранування деталей; необхідність роботи на підвищеній (порівняно з 50 Гц) частоті.

Проте в переважній більшості випадків ці обмеження можна з успіхом обійти [34, 35]: у більшості випадків достатнього екранування можна досягти за рахунок конструкції датчика, а практика показує, що ємнісні датчики дають гарні результати на широко поширеній частоті 400 Гц; властивий конденсаторам крайовий ефект стає значним, лише тоді коли відстань між обкладинками велика порівняно з лінійними розмірами розглянутих поверхонь. Залишається лише захищати датчик від факторів навколишнього середовища, які можуть погіршити ізоляцію між обкладинками – від пилу, корозії, вологості, іонізуючої радіації.

Ємнісні датчики відрізняються своєю простотою, що дозволяє створювати міцні і надійні конструкції.

Індуктивні і магнітні датчики або диференційно-трансформаторні датчики переміщення об'єктів принцип дії яких полягає у використанні принципу електромагнітної індукції. При переміщенні ОБ між двома котушками змінюється магнітний потік [36]. На цьому принципі реалізуються лінійно-регульовані диференціальні трансформатори (ЛРДТ), поворотно-регульовані диференціальні трансформатори (ПРДТ) та індуктивні датчики.

Існує два способи зміни потокозчеплення між котушками або між котушкою і об'єктом. Перший спосіб – за рахунок переміщення об'єкта, а другий – шляхом переміщення котушки відносно об'єкта або іншої котушки. У датчиках такого

типу широко застосовують ЛРДТ [33, 37].

ЛРДТ – це трансформатор з механічно керованим осердям на первинну обмотку якого подається синусоїдальна напруга постійної амплітуди. Застосування синусоїдальної напруги дозволяє позбутися паразитних гармонік. На вторинних обмотках індукуються також змінна напруга. У циліндричному отворі між котушками розміщується осердя з феромагнітного матеріалу. При цьому осердя не торкається обмоток. Дві вторинні обмотки включені в протифазі. При розміщенні осердя в центрі трансформатора, вихідні сигнали вторинних котушок взаємно знищують один одного, тому на виході трансформатора напруга відсутня. Переміщення осердя в сторону від центрального положення призводить до зміни магнітних потоків у вторинних обмотках. В результаті розбалансу, що виникає з'являється вихідна напруга. Зміна магнітних потоків відбувається за рахунок зміни магнітних опорів простору між котушками. З усього вищесказаного випливає, що величина потокозчеплення визначається осьовим положенням осердя. Тому вихідна напруга може служити мірою переміщення ОВ. Вихідний сигнал ЛРДТ не тільки показує величину переміщення, але і його напрямок. Напрямок переміщення визначається фазовим кутом між опорною і вихідною напругою [36]. На рис. 2.9 приведено принципову схему ЛРДТ та спрощену схему датчика переміщень на основі ЛРДТ з інтерфейсом.

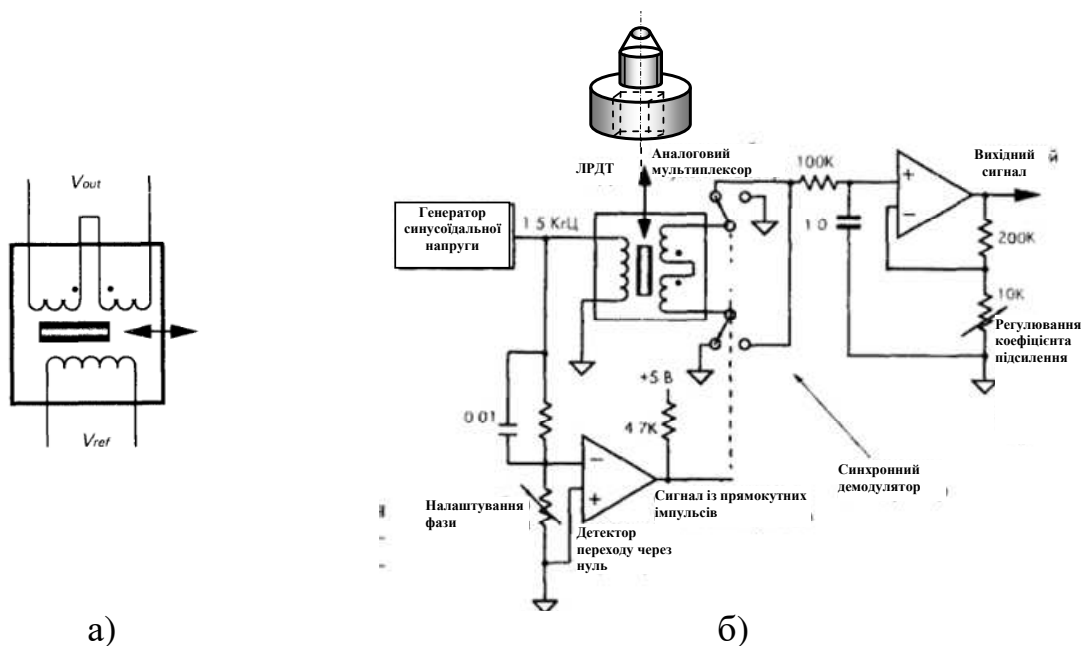


Рис. 2.9. Схема ЛРДТ: а) принципова, б) спрощена схема датчика переміщень на основі ЛРДТ з інтерфейсом [36]

ЛРДТ мають наступні переваги [33, 36, 37]: датчики, реалізовані на їх основі, є безконтактними пристроями з практично нульовими втратами на тертя; незначним гістерезисом як магнітним, так і механічним; дуже низьким вихідними імпедансом; високої завадостійкості; міцною і надійною конструкцією; дуже високою роздільною здатністю.

ПРДТ працюють на тому ж принципі, що і ЛРДТ, за винятком того, що в них використовуються осердя, що обертаються. Основне застосування ПРДТ – вимірювання кутових переміщень. Лінійний діапазон вимірювань таких датчиків складає близько $\pm 40^\circ$ з похибкою нелінійності близько 1%. Переваги ПРДТ аналогічні до переваг ЛРДТ [36, 36].

Фотоелектричні перетворювачі кута. Основною складовою фотоелектричних перетворювачів є фотоелемент, який слугує для перетворення світлової енергії в електричну енергію фотоструму. Найбільшого поширення набули перетворювачі з безперервною характеристикою. Їх принцип дії полягає в перетворенні лінійного переміщення в зміну величини світлового потоку, що падає на фотоелемент. Останнім часом набувають поширення фотоелектричні перетворювачі на фоторезисторах, що мають дискретну характеристику. Світловий потік, що падає на чутливий елемент фотоелектричного перетворювача, найчастіше модулюється за допомогою шторок, прапорців або заслінок, переміщення яких пов'язано зі зміною перетворювальної лінійної або кутової величини. На рис. 2.10 приведена схема, що ілюструє роботу фотоелектричних перетворювачів.

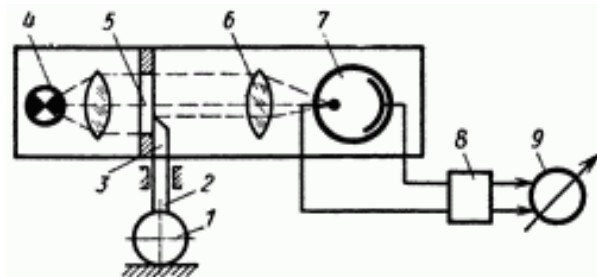


Рис. 2.10. Схема фотоелектричного перетворювача з перекриттям світлового потоку: 1 – об'єкт вимірювання, 2 – вимірювальний стрижень, 3 – заслінка, 4 – світловий випромінювач, 5 – діафрагма, 6 – об'єктив, 7 – фотоелемент, 8 – підсилювач, 9 – вимірювальний прилад градуйований в одиницях вимірювання фізичної величини

При вимірюванні фізичної величини деталі 1, суміщається вимірювальний стрижень 2 і закріплена на його кінці заслінка 3, що призводить до зміни величини світлового потоку, який йде від світлового випромінювача 4 через діафрагму 5 і об'єktiv 6 до фотоелементу 7. Фотострум, що відповідає величині світлового потоку підсилюється за допомогою підсилювача 8 і вимірюється приладом 9, проградуированим в одиницях вимірювання фізичної величини.

Досить поширеним є застосування *кільцевих лазерів* (КЛ) в якості вимірювальних перетворювачів кутової швидкості [39 – 40]. Застосування практично без інерційних КЛ дозволяє робити безконтактне перетворення кутів з обробкою інформації в реальному масштабі часу, що дає можливість працювати в динамічному режимі при високих кутових швидкостях. Частотний вихід КЛ дозволяє легко робити перетворення інформації в цифровий код і здійснювати її подальшу обробку цифровими методами. При цьому КЛ мають дуже високу роздільну здатність та високу точність, яка сягає тисячні долі кутової секунди. Проте їх недоліком є обмежений діапазон швидкостей обертання в якому зберігаються необхідні точнісні характеристики. Точність вимірювання кутів за допомогою КЛ у яких використовується заздалегідь визначений масштабний коефіцієнт [42], невисока через недостатню стабільність останнього.

Використовуючи особливості вимірювання кутів за допомогою перетворювачів, що працюють у діапазоні $0-2\pi$ (можливість точної фіксації кута повороту 2π), у роботі [43] запропонований метод самокалібровки, що дозволив різко підвищити точність вимірювання кутів.

Перші експериментальні роботи, проведені у ВНДІМ ім. Д. І. Менделєєва, показали, що з використанням принципу самокалібровки можуть бути досягнуті високі точності [44] у діапазоні вимірювання кутів $0 - 2\pi$. У роботі [45] приведена схема експериментальної установки, на якій виконувалися вимірювання плоских кутів. Установка за один вимірювальний прийом дозволяла робити вимірювання одного кута призми, систематична складова похибки становила порядку $0,4''$, середньоквадратичне відхилення випадкової складової – порядку $1,2''$. Похибка за рахунок горизонтального переміщення призми – $0,6''$ при зрушенні на 1 мм.

У ЛЭТИ ім. Ульянова (Російська Федерація) створена установка для вимірювання кутів багатограних призм [46] на основі КЛ, у якій

використовується прецизійний поворотний пристрій на аеростатичній опорі, інтерференційний автоколіматор та інші нові на той час технічні рішення. Установка за один прийом дозволяє робити вимірювання одного кута багатогранної призми. Вибір кута виконується шляхом затінення інших граней призми екраном.

Відомий також лазерний перетворювач кругових (кутових) переміщень на основі КЛ, що дозволяє робити вимірювання кутів з точністю 1,2" [47].

На сьогодні сучасними дослідниками доведено ефективність застосування КЛ в якості прецизійного датчика кута. Так відома низка робіт в яких приводяться результати роботи КЛ у високоточних кутовимірювальних приладах [48 – 50]. У роботі [51] описано спеціалізований гоніометр на основі КЛ, що використовується в цехових умовах для вимірювання кутів багатогранних призм. У роботі [52] описана кутовимірювальна система (гоніометр-спектрометр), яка призначена для вимірювання плоских кутів і пірамідальності граней призм, а також показників заломлення оптичних середовищ.

З використанням КЛ розроблено прилад для вимірювання евольвентного профілю лінії зуба зубчатих коліс [53], установка для відтворення лінійних прискорень [54].

На сьогодні, на основі накопиченого досвіду та знань в галузі лазерної гоніометрії розроблено досить багато різноманітних систем вимірювання кута, та здійснюється серійне виробництво КЛ. Характеристики найбільш розповсюджених КЛ серійного виробництва приведені в табл. 2.2.

На основі КЛ розроблені автоматичні прилади для вимірювання кута повороту вала, прилади для контролю кутових параметрів лімбів, модуляторів, кодових дисків та інших кутових структур, прилади для визначення кутів між віхами, зірками, астрономічні і геодезичні прилади, прилади лазерної локації тощо. В літературі [48] експериментально показані переваги використання кільцевих лазерів у системах стабілізації швидкості обертання.

Як вказується в літературі [55] вимоги до КЛ, що застосовуються у кутовимірювальних приладах, багато в чому відрізняються від вимог, які висуваються до КЛ, що використовуються у навігації. Так, наприклад, для КЛ, що використовуються у навігації висувають вимоги щодо мінімальності зони захвату,

можливості вимірювання малих кутових швидкостей, можливості роботи в широкому частотному діапазоні, вібро- та ударостійкості, стабільності масштабного коефіцієнту протягом тривалого часу тощо. Для забезпечення вказаного КЛ оснащують пристроями розносу частот (резонаторами). До таких КЛ висуваються жорсткі обмеження щодо габаритних розмірів та маси. В наслідок вказаного КЛ для навігаційних систем мають досить високу собівартість.

Таблиця 2.2

Сучасні ЛГ серійного виробництва [56]

Виробник	Honeywell, США			Northrop Grumman (Litton), США		
Модель	GG-1342	GG-1320	GG-1308	LG-2728	LG-2717	ZLG
Периметр, см	32	15	6,1	28	17	18
Маса, кг	1,9	–	0,2	1,5	1,5	–
Габаритні розміри, см	15,7×14,7×5	–	–	14×17,7×5	14×11×6,5	–
Матеріал	Cervit			Zerodur		
Підставка	Вібропідставка					Фарадієва підставка, неплоский контур 4-частотний режим
Кількість дзеркал	3	3	3	4	4	4
Максимальна кутова швидкість, %с	800	500	1000	400	800	400
Стабільність зсуву нуля (1-10 год.), %год.	0,007	0,002	1,0	0,005	0,02	–
Стабільність зсуву нуля між запусками, %год	0,01	–	1,0	0,01	0,04	0,003
Випадковий дрейф, град/√год	0,003	0,0018	0,1	0,003	0,015	0,0015
Масштабний коефіцієнт (МК), кут. с/імп	2,0	4,0	9,0	1,8	3,0	0,75
Стабільність МК	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-7}$
Температурна залежність зсуву нуля, (%год)/°C	0,002	–	–	–	–	0,002
Виробник	НПК “Електрооптика”, РФ		НИИ “Полус”, РФ	ВАТ МІЕА, РФ	ВАТ “ТЕМПАВ А”, РФ	ВАТ “Раменський приладобудівельний завод”, РФ

Закінчення табл. 2.2

Модель	ГЛ-1	ГЛ-2	МТ-401	ЛГ-2	ЛГ-2	ГЛ-1	ЛЧЭ
Периметр, см	44	28	16	28	16	–	
Маса, кг	4	2	5,5	1,8	1,5	4	
Габаритні розміри, см	Ø20,6×10	15,4×11,6×9	Ø18×14	145×130×47	–	Ø206×105	Ø176×166
Матеріал	Ситал		Ситал	Ситал	–	–	–
Підставка	Вібропідставка		Зеєманівська знако-змінна	Вібро-підставка			
Кількість дзеркал	4	4	4	4	4	4	3×3
Максимальна кутова швидкість, %с	360	500	600	–	200	90	400
Стабільність зсуву нуля (1-10 год.), %год.	0,07	0,01	05 – 1,0	0,01	0,4	0,05	–
Стабільність зсуву нуля між запусками, %год.	0,01	0,01	0,3	–	–	0,02	0,1
Випадковий дрейф, град/√год	0,003	0,005	–	–	–	–	–
Масштабний коефіцієнт (МК), кут. с/мп.	1,3	2,24	3,33	2,2	–	–	–
Стабільність МК	1×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁶	–	1×10 ⁻⁵	7×10 ⁻⁵	5×10 ⁻⁵	5×10 ⁻⁵
Температурна залежність зсуву нуля, (%год.)/°С	0,003	0,002	–	–	–	–	–

В зв'язку із специфікою застосування КЛ у гоніометричних системах, розробляються спеціальні КЛ (рис. 2.11), вимоги до яких є кардинально відмінними від вимог до КЛ для навігаційних систем. Так, наприклад, в літературі [55] вказується, що при кутових вимірюваннях у промислових масштабах, як правило, вимірювальні гоніометричні системи не піддаються впливу ударів і вібрацій, їх робота відбувається у вузькому температурному діапазоні. У більшості випадків КЛ для гоніометричних систем не потрібен пристрій розносу частот. Використання в кутовимірювальних приладах, наприклад, гоніометрах, принципу самокалібрування [55] дає змогу значно знизити вимоги до довгочасної стабільності масштабного коефіцієнта КЛ. При цьому в багатьох випадках вимоги

щодо мінімальних габаритів і маси КЛ не є основними. Тому конструкція таких лазерів простіша і вони повинні бути дешевшими.



Рис. 2.11. Кільцевий лазерний гіроскоп КП СПБ “Арсенал”, Україна

Крім того, їх вартість знижується за рахунок зменшення об’єму випробувань. Разом з тим в літературі [55] вказується, що до таких КЛ висувається низка додаткових вимог, щодо збільшення строку експлуатації (від декількох тисяч до десятків тисяч годин), високого кутового розділення для забезпечення високих точностей.

Зі літератури [55, 56] відомо, що для кутовимірювальних приладів різного призначення розробляють різні типи КЛ. Так виділяють три групи кутовимірювальних засобів, для яких потрібні відповідні КЛ.

I група – кутовимірювальні засоби високої точності, в тому числі на рівні Національних еталонів. Такі засоби являють собою, як правило, стаціонарні установки, тому для КЛ, що є елементами вказаних систем не висуваються жорсткі вимоги щодо їх габаритних розмірів.

II група – цехові кутовимірювальні засоби, що являють собою переносні прилади, у яких маса і габарити КЛ повинні бути обмежені.

III група – компактні кутовимірювальні засоби низької точності, у яких маса і габарити КЛ повинні бути жорстко обмежені.

Пропонована ППСВК повинна мати високу точність, тому в якості датчика кута системи пропонується використовувати КЛ, розроблений в КП СПБ “Арсенал” за участю кафедри приладобудування Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, що виконаний за класичною схемою (рис. 2.12).

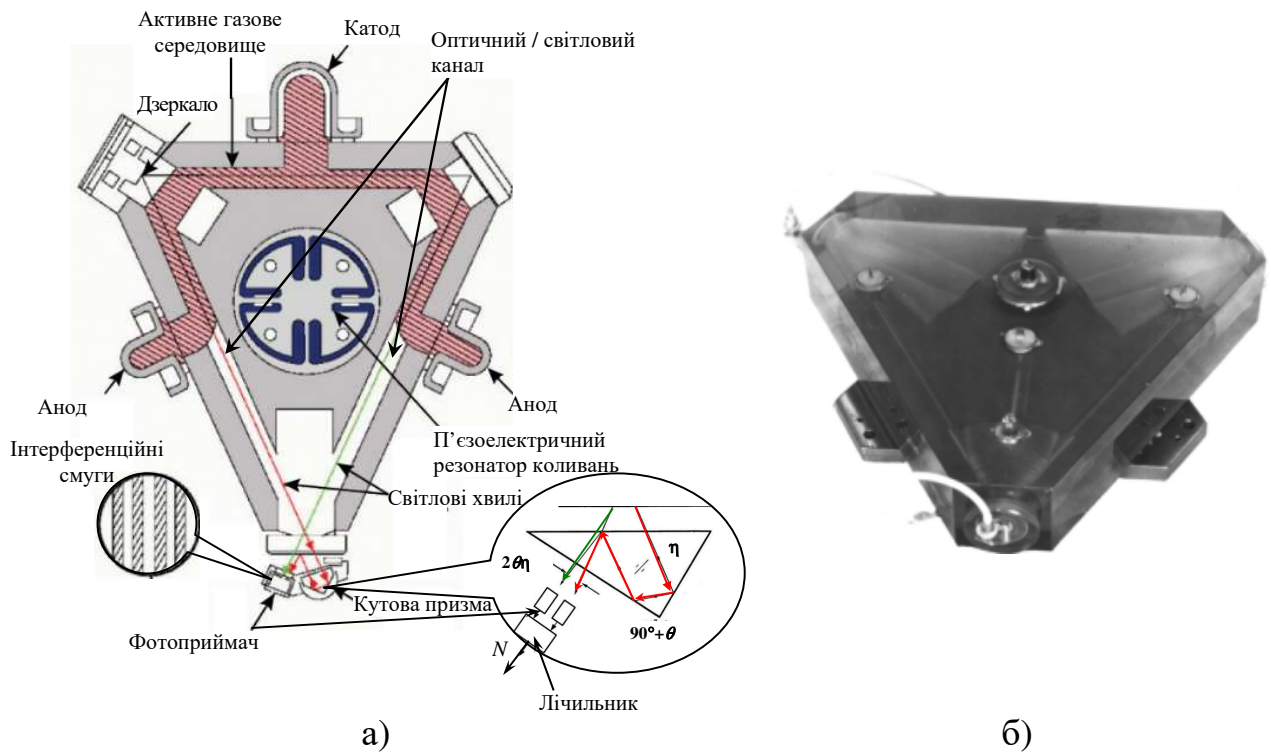


Рис. 2.12. КЛ 3.970.029 розроблений КП СПБ “Арсенал” спільно з

кафедрою приладобудування Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”:

а) структурна схема, б) зовнішній вигляд

Резонатор КЛ складається з трьох дзеркал і виконаний у вигляді рівностороннього трикутника. Одне дзеркало розташоване на п'єзоперетворювачі. За його допомогою здійснюється підстроювання розміру периметра P резонатора. На другому дзеркалі розташована змішувальна оптика з чотирьохсекційним фотоприймачем інформаційного кола, на третьому – призма з фотоприймачем кола підстроювання потужності випромінювання.

Елементи живлення розташовані таким чином, що забезпечують компенсацію ленгмюровського дрейфу (за схемою: два аноди, один катод). У пасивному каналі виконана діафрагма.

Герметизація робочого об'єму досягається вакуумно щільними з'єднаннями. Дзеркала встановлені на оптичному контакті, а з'єднання вводів анодів і катода виконані з застосуванням паяння металом.

Моноблок посадочною площиною кріпиться за допомогою клею до металічної пластини з матеріалу з малим коефіцієнтом лінійного розширення. У пластині є три отвори, призначені для кріплення у кутовимірювальних приладах.

Для забезпечення більшого об'єму робочої газової суміші (He-Ne) в моноблоці виконані пазухи.

Принцип роботи КЛ полягає в тому, що під дією напруги елементів живлення (двох анодів та катоду), в активному газовому середовищі збуджуються і генеруються дві світлові хвилі однієї і тієї ж частоти, що поширюються в протилежних напрямках по загальному світловому каналу у вигляді вузьких монохроматичних світлових пучків.

Рівняння першої хвилі описується наступним відомим виразом:

$$y = A \sin \frac{2\pi}{\lambda}(x - ct), \quad (2.15)$$

де A – амплітуда коливань,

λ – довжина хвилі,

c – швидкість світла.

Довжина хвилі λ , що генерується КЛ (в межах ширини спектральної лінії робочої речовини), визначається умовою, згідно з якою хвиля, що біжить, обійшовши контур резонатора, повинна прийти у вихідну точку з тією ж фазою, яку мала спочатку. Якщо прилад нерухомий, то це має місце, коли в периметрі P контуру укладається ціле число n хвиль довжиною λ_0 , тобто $P = n\lambda_0$. В цьому випадку лазер генерує 2 зустрічні хвилі. Рівняння другої зустрічної хвилі описується відомим виразом (2.16) наступним чином:

$$y = A \sin \frac{2\pi}{\lambda}(x + ct). \quad (2.16)$$

Частоти цих хвиль однакові та дорівнюють:

$$\nu_0 = c/\lambda_0 = cn/P, \quad (2.17)$$

де c – швидкість світла;

n – кількість хвиль

P – периметр резонатора КЛ.

При накладанні цих хвиль, отримується стояча хвиля (рис. 2.13) з амплітудою A , яка змінюється за гармонічним законом з частотою $\nu = 2\pi c/\lambda$ світлових коливань, та описується рівнянням (2.18):

$$y = 2A \cos \frac{2\pi}{\lambda} ct \cdot \sin \frac{2\pi}{\lambda} x. \quad (2.18)$$

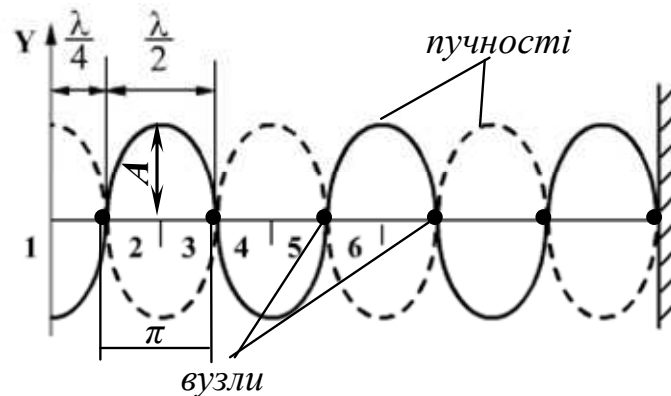


Рис. 2.13. Вигляд стоячої хвилі

Стояча хвиля не рухається в просторі, її особливістю є наявність характерних місць (рис. 2.13), що називають вузлами та пучностями. У вузлах амплітуда $A = 0$, а у пучностях $A = \max$.

Якщо КЛ обертається з кутовою швидкістю ω , то за час обходу хвилею контуру, останній встигає повернутися на деякий на кут φ . В залежності від напрямку розповсюдження хвилі (“+” – умовне позначення напрямку за годинниковою стрілкою, “–” – умовне позначення напрямку проти годинникової стрілки), шлях що вона проходить до суміщення фази буде більшим або меншим периметру P . В наслідок цього частоти зустрічних хвиль стають різними. Частоти ν_- та ν_+ цих хвиль не залежать від форми контуру і пов’язані із швидкістю ω обертання КЛ за виразом (2.19) наступним чином:

$$\nu_{\pm} = \nu_0 \pm 2 \frac{\nu_0}{c} \frac{S \omega \cos \nu}{P}, \quad (2.19)$$

де S – площа контуру резонатора;

P – периметр резонатора.

Фотоприймач який чутливий до інтенсивності світла, зафіксує коливання змінної амплітуди тобто так звані биття різної частоти:

$$\Delta \nu = \nu_+ - \nu_- = K F \cos \varphi, \quad (2.20)$$

де K – масштабний коефіцієнт КЛ, $K = 4\pi \frac{S}{\lambda P}$;

F – частота проходження утворюваних інтерференційних смуг, яка дорівнює кількості N пучностей (вузлів) стоячої хвилі, що проходять через задану точку в одиницю часу, або вкладаються на дузі, яка відповідає куту φ , на який повернеться прилад за одиницю часу, $F = \frac{N}{t} = \frac{\omega}{\varphi_0} = \frac{\omega}{2\pi}$.

Наприклад, для квадратного гелій-неонового (He-Ne) КЛ зі стороною 25 см $\lambda_0 = 6 \cdot 10^{-5}$ см, масштабний коефіцієнт $K = 2,5 \cdot 10^{-6}$. Граничне значення чутливості оптичних КЛ визначається випадковим випромінюванням атомів активного середовища лазера, що призводить до появи випадкових похибок КЛ. Якщо частоті биття $\Delta\nu = 1$ Гц відповідає кут повороту $\varphi = 1$ град/год., то гранична точність КЛ становитиме 10^{-3} град/год. [57, 58].

В КЛ з периметром P умову генерації світлових хвиль можна записати наступним виразом:

$$\begin{aligned} m\lambda_{\pm} &= P_{\pm} \\ \text{або} \\ \nu_{\pm} &= \frac{mc}{P_{\pm}}, \end{aligned} \quad (2.21)$$

де m – число, що характеризує повздовжній тип коливань, $m = 10^5 \dots 10^6$;

λ_{\pm} – довжини хвиль;

ν_{\pm} – частоти коливань;

P – периметр.

Інтерференційна картина на виході КЛ описується виразом (2.22):

$$I = I_0 \left(1 + \cos\left(2\pi\varepsilon \frac{x}{\lambda} + \Delta\omega t + \varphi\right) \right), \quad (2.22)$$

де $\Delta\omega = 2\pi\Delta\nu$ – кутова частота биття;

$\varepsilon = 2\eta\theta$;

η – показник переломлення призми;

θ – відхилення кута при вершині від 90° ;

φ – постійний зсув фаз.

Відстань між смугами інтерференційної картини (рис. 2.13, а) становить λ/ε . Для отримання інтерференційної картини з заданою відстанню між смугами, наприклад 1 – 3 мм кут при вершині призми (рис. 2.8, а) повинен відхилятися від прямого кута на величину θ , що становить близько $10'' - 20''$.

Вихідна інформація з КЛ зчитується фотоприймачами. У випадку нерухомого КЛ при $\omega = 0$ частоти зустрічних хвиль дорівнюють нулю: $\Delta\nu = 0$ і інтерференційна картина нерухома. При обертанні КЛ відносно осі, що перпендикулярна площині контуру резонатора, і яку називають віссю чутливості, інтерференційна картина переміщується зі швидкістю пропорційною $\Delta\nu$, в наслідок чого на виходах фотоприймачів формуються синусоїдальні сигнали, зсунуті по фазі на $1/4$ періоду. Напрямок обертання КЛ визначається напрямком переміщення інтерференційної картини.

Синусоїдальні сигнали за допомогою електронних схем перетворюються у послідовність імпульсів, кількість яких підраховується лічильником (рис. 2.12, а). На виході лічильника формується число N , що є пропорційним величині $\Delta\nu$, і відповідно величині вимірюваного кута. Знак “+” або “-” числа N вказує напрямок обертання, за або проти годинникової стрілки відповідно.

Таким чином, КЛ є інтегровальним пристроєм, що вимірює інтегральний кут повороту лазера в інерційному просторі за час t знімання інформації:

$$N = \int_0^t \Delta\nu dt. \quad (2.23)$$

Як правило, частота знімання інформації знаходиться в діапазоні від 10 до 100 Гц.

Технічні характеристики КЛ розробленого КП СПБ “Арсенал” спільно з кафедрою приладобудування Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” приведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Технічні характеристики КЛ 3.970.029 розробки КП СПБ “Арсенал”
спільно з кафедрою приладобудування Національного технічного
університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського”

1. Матеріал моноблока	Склокристалевий матеріал “Ситал”
2. Форма резонатора	Рівнобічний трикутник
3. Тип віддзеркалюючих елементів	Багатошарові інтерференційні діелектричні дзеркала
4. Довжина сторони резонатора, мм	227
5. Тип елемента підстроювання периметра	Переміщення дзеркала п’єзоперетворювачем
6. Довжина хвилі випромінювання, мкм	0,6328
7. Тип поляризації випромінювання	Лінійна
8. Вихідний інформаційний сигнал	Два синусоїдальних сигнали
9. Зсув фаз між двома інформаційними сигналами, ел. град.	90 ± 5
10. Кутова ціна періоду інформаційного сигналу, пер/кут. с.	1,0
11. Живлення кільцевого лазера напруга, В, не більше струм, мА, не більше	Постійний струм 900 3,0
12. Габарити, мм - висота - радіус описаного кола, за який не виходять елементи конструкції	160 83
13. Маса (з основою), кг, не більше	4,3

Для вимірювання кутів широко використовуються кільцеві лазери, зокрема КЛ 3.970.029 КП СПБ “Арсенал”, що має високу точність (табл. 2.4) [81].

Розглянутий кільцевий лазер використовується в гоніометричній системі ГСІЛ та автоматизованому прецизійному пристрої для вимірювання кутів [81].

Точність вимірювання кутів за допомогою кутовимірювальних засобів на основі КЛ визначається багатьма факторами, обумовленими параметрами підсистем такого приладу. Наприклад, у випадку гоніометра це нестабільність швидкості обертання поворотного пристрою, неточність реєстрації початку і закінчення відліку контрольованого кута, дискретність квантування інформаційного сигналу тощо. [81].

Параметри кільцевого лазера 3.970.029, у випадку його використання як датчика кута [81]

Найменування параметра	Кільцевий лазер 3.970.029
Габарити, мм:	
Висота	83
Діаметр	
Радіус описаного кола, за який не виходять елементи конструкції	160-
	4,3
Маса, кг	
Похибка, кут. с.	$\pm 0,08$
Вартість, євро:	
Одного датчика	5500
Датчика з корегуючим пристроєм AWE 1024	

У загальну похибку вимірювання кутів КЛ вносить власні складові, обумовлені нелінійністю і зсувом нуля вихідної характеристики, нестабільністю масштабного коефіцієнта, відношенням сигнал/шум інформаційного сигналу тощо.

Похибка, обумовлена нелінійністю вихідної характеристики, легко зменшується роботою у динамічному режимі при підвищеній кутовій швидкості. Зсув нуля вихідної характеристики зменшується за рахунок відповідної конструкції кільцевого лазера і його компонентів, а також балансу струмів у плечах живлення [81].

Виміри кутів системою ГСІЛ проводяться при кутовій швидкості 90 град/с. В такому випадку похибка вимірювання кутів, обумовлена лінійним дрейфом масштабного коефіцієнта при швидкості 90 град/с не перевищує 0,1". [81]. Використовується принцип самокалібрування [8], тобто за один повний оберт КЛ визначається кутова ціна періоду його інформаційного сигналу, з використанням якої обчислюються вимірювані кути. Тому стабільність масштабного коефіцієнта повинна бути забезпечена протягом 4 с. Ця обставина значно знижує вимоги до довгочасної стабільності масштабного коефіцієнта [81].

2.2.3.2. Фотоприймач КМОП-матриця

В якості сучасних фотоприймальних пристроїв широко використовують матричні фотоприймачі – ПЗС-матриці та лінійки. Зокрема передові закордонні виробники прецизійної кутовимірювальної техніки, наприклад, “TRIOPTICS” (Німеччина) та “MOELLER-WEDEL” (Німеччина) [59, 60, 61] випускають прецизійні автоколіматори на ПЗС-матрицях з фокусною відстанню від 100 до 1000 мм, роздільною здатністю від 0,01” до 0,1” та похибкою від 0,2” до 2,5” (для автоколіматорів “TRIANGLE”) [60] та ПЗС-лінійок з роздільною здатністю 0,005” і похибкою від 0,1” до 0,01” (для автоколіматорів “ELCOMAT 3000”, “ELCOMAT HR”) [61]. Унікальність матричних фотоприймачів полягає в тому, що вони формують інформаційний сигнал і одночасно виступають в якості вимірювальної шкали. В теперішній час матричні фотоприймачі широко використовують для вирішення широкого кола задач при лінійних та кутових вимірюваннях [59].

В теперішній час виробники прецизійної вимірювальної техніки, поряд із традиційними ПЗС-матрицями використовують активні піксельні датчики – CCD, CMOS та APS (CMOS – Complementary MetalOxide Semiconductor, APS – Active Pixel Sensor), основані на сенсорах, створених на компліментарних структурах метал-окисел-напівпровідник (КМОП) [62, 63].

Компліментарна структура це чіп, побудований за схемою, в якій *p*-канальні і *n*-канальні польові транзистори використовуються парами і взаємно доповнюють один одного. Кожен піксель активно-піксельного сенсора на відміну від ПЗС-матриць містить не тільки фотодетекторний елемент (фотодіод або фотозатвор (photogate)), а також і активно-транзисторну схему (“обв’язку”) для зчитування сигналу з пікселя. Технологія КМОП дозволяє інтегрувати всю систему формування зображення, включаючи масив світлочутливих елементів і керуючі схеми, на одному кристалі кремнію [63].

CCD- та КМОП-матриці, являють собою напівпровідникові сенсори побудовані на фотоелектронних напівпровідникових елементах (фотоелементах). Так, наприклад, КМОП-матриця – напівпровідниковий сенсор, побудований на основі КМОП-транзисторів (рис. 2.14).

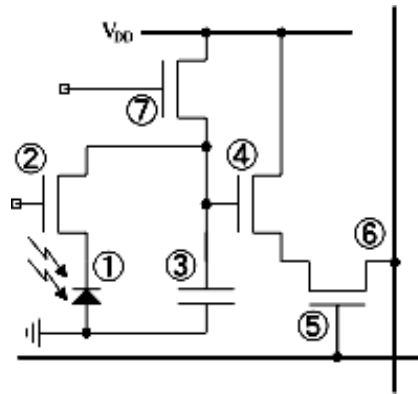


Рис. 2.14. Еквівалентна схема чутливого елементу (активно-піксельного датчика) КМОП-матриці компанії Micron Technology: 1 – світлочутливий елемент; 2 – затвор; 3 – конденсатор, який зберігає заряд з діода; 4 – підсилювач; 5 – шина вибору рядка; 6 – вертикальна шина, що передає сигнал процесору; 7 – сигнал скидання

Функціональна схема роботи активно-піксельного датчика CCD- та КМОП-матриць представлена на рис. 2.15.

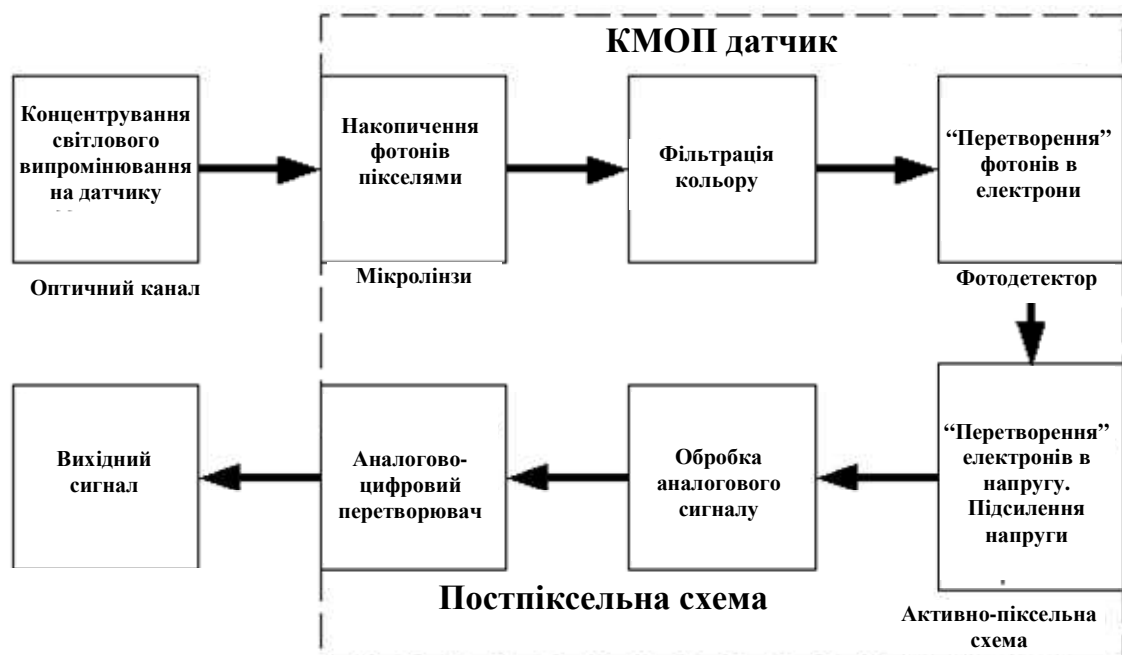


Рис. 2.15. Функціональна схема роботи активно-піксельного датчика CCD- та КМОП-матриць [63]

При відкритому затворі фотони збираються на сенсорі, тобто відбувається накопичення фотонів в кожному пікселі датчика – за допомогою лінзи, встановленої на кожному пікселі, концентруються в фоточутливу область пікселя (структура різних типів чутливих елементів пікселя представлена на рис. 2.16).

При цьому відбувається фільтрація кольору. Фотон, потрапляючи на фотодетектор фотодіода, вибиває електрони, які накопичуються в, так званих, потенційних ямах. Накопичені електрони створюють різницю потенціалів. За сигналами, що синхронізуються з генератора імпульсів, відбувається одночасне зчитування накопичених зарядів – всіх, або з окремих пікселів, зазначених оператором. Отриманий сигнал занадто малий для самостійного використання, тому він проходить через підсилювач. Після цього відбувається обробка аналогового сигналу і перетворення аналогового сигналу в цифровий [63].

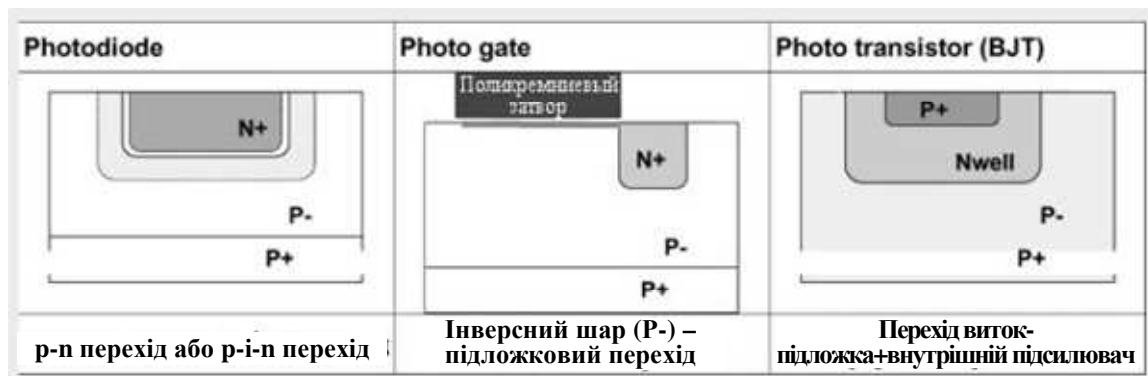


Рис. 2.16. Структури фотоелектронних напівпровідникових елементів, що складають основу матричних фотоприймачів, зокрема CCD-, КМОП-матриць [63]

Кожен елемент з масиву пікселів має виходи на сітку металевих провідників, що дозволяє тимчасовим, зчитувальним і вихідним сигналам проходити по всім коміркам. Виходи даної сітки приєднані до зчитувальних і декодувальних елементів, які розташовуються поза масиву пікселів. Така архітектура дозволяє зчитувати дані як з усього масиву пікселів, так і з деяких його частин та з окремих пікселів, з використанням простої ХУ адресації, що неможливо в ПЗС-матрицях. Структура КМОП-сенсора і його збільшена фотографія представлені на рис. 2.17 та рис. 2.18 відповідно. Реальний розмір однієї комірки КМОП-матриці (див. рис. 2.18) складає приблизно від 1 до 15 мкм.

Відповідно до прийнятої термінології, активний піксель – це піксель, що містить елемент, який розсіює потужність. У більшості випадків в якості активного елемента виступає MOSFET в підсилювальній або буферній конфігурації. MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) – це тип транзистора, заснований на структурі метал-оксидного напівпровідника.

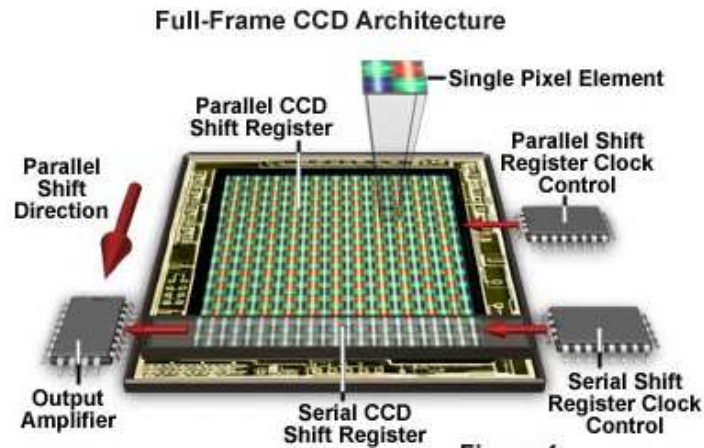


Рис. 2.17. Архітектура активно-пиксельного датчика CCD- та КМОП-матриць

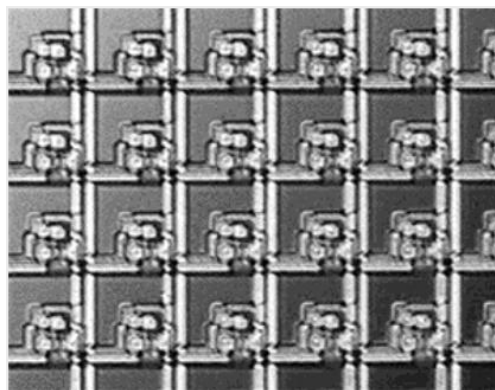


Рис. 2.18. Структура сенсора [63]

Струм між емітером і колектором протікає через інверсний шар, керований напругою на базі. Наявність тільки одного транзистора типу MOSFET, що грає роль тільки перемикача, ще не робить піксель “активним”. Активний піксель це одиничний елемент твердотільної решітки, що володіє фотоелектричною передавальною функцією при дії світлового електромагнітного випромінювання. При цьому у кожного пікселя є власний зчитувальний транзисторний підсилювач (readout amplifier transistor), що дозволяє “перетворювати” заряд в напругу безпосередньо на пікселі [63]. Для зчитування заряду використовуються пристрої, які називаються регістрами зсуву, що перетворюють рядок зарядів на вході в послідовність імпульсів на виході. Швидкодія такої схеми обмежена швидкістю роботи регістра зсуву кількістю рядків матриці.

В основі фізичних принципів роботи фотоелектронних напівпровідникових елементів, що складають основу матричних фотоприймачів або сенсорів, зокрема CCD-, КМОП-матриць, лежить явище внутрішнього фотоефекту. Явище

внутрішнього фотоефекту полягає в тому, що при опроміненні світлом фотоелектронних напівпровідникових елементів в них відбувається зміна внутрішнього стану. Зокрема спостерігається збільшення електропровідності пропорційно інтенсивності світлового потоку. Чутливість S_λ фотоелементів залежить від довжини світлової хвилі λ та визначається за формулою (2.2). Чутливість S_λ фотоелементу залежить від довжини λ світлової хвилі і представляється виразом (2.3). Світловий потік $\Phi(\lambda)$ являє собою частину потоку випромінюваної світлової енергії $E(\lambda)$. Світловий потік $\Phi(\lambda)$ взаємопов'язаний із випромінюваним потоком світлової енергії $E(\lambda)$ (див. вираз (2.5)), що визначається за виразом (2.6) (див. п. 2.2.2 даного розділу).

У ППСВК запропоновано використання фоточутливої КМОП-матриці з розмірністю пікселів $1,0 \times 1,0$ мкм, наприклад, OV16880 або OV20880 виробництва OmniVision (США), що дозволяє досягти похибки вимірювання автоколіматора $0,1''$.

2.2.3.3. Штучна нейронна мережа

Пропоновані ШНМ, що використовуються як базові елементи підсистеми обробки та відображення сигналу запропонованої ППСВК для автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання та для автоматичного розпізнавання хімічних елементів, за визначенням являють собою обчислювальні структури, що моделюють прості біологічні процеси, аналогічні процесам, що відбуваються в людському мозку [2, 86, 87].

На сучасному етапі науково-технічного прогресу, ШНМ як набір математичних і алгоритмічних методів широко застосовують для вирішення широкого кола задач, серед яких особливе місце займають задачі прогнозування, класифікації та розпізнавання образів. В контексті розв'язуваних задач пропоновані ШНМ дозволяють автоматизувати аналіз множини вимірюваних даних в режимі реального часу [2, 86 – 91]. При цьому висока оперативність, ймовірність правильної обробки інформації в умовах її неповноти та суперечливості, а також простота навчання та перенавчання дозволяють вчасно переходити на нові види розв'язуваних задач при зміні зовнішніх факторів.

Пропоновані ШНМ являють собою обчислювальні структури, здатні до

адаптивного навчання шляхом реакції на позитивні і негативні впливи [2, 86 – 91]. Основою структури пропонованих ШНМ є елементарний перетворювач – штучний нейрон (ШН) (рис. 2.19). ШН складається з елементів трьох типів – помножувачів, які грають роль синапсів (аналогічно до біологічного прототипу), суматора та нелінійного перетворювача.

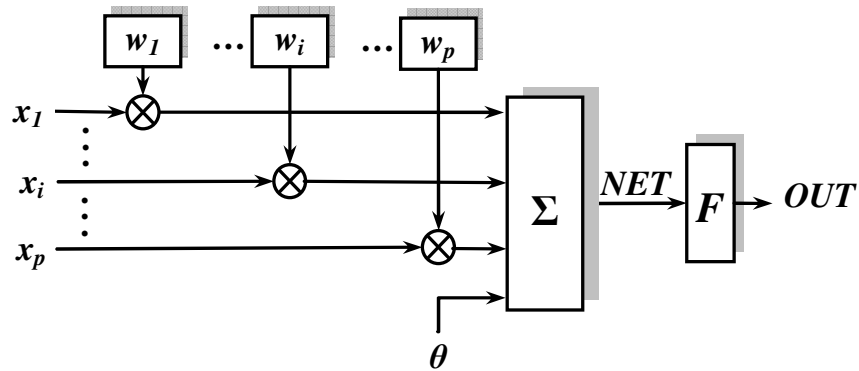


Рис. 2.19. Структурна схема штучного нейрону

Синапси інформаційно зв'язують нейрони, шляхом множення вхідного сигналу x_i на коефіцієнт сили зв'язку w_i . – ваговий коефіцієнт / вагу синапсу / синаптичну вагу. Суматор підсумовує сигнали, що поступають по синаптичним зв'язкам від інших нейронів, і зовнішніх вхідних сигналів. Нелінійний перетворювач реалізує функцію активації – нелінійну функцію виходу f суматора. Схематично ШН прийнято представляти у вигляді кола, що має декілька входів та один вихід, що позначаються відповідними лініями (рис. 2.20).

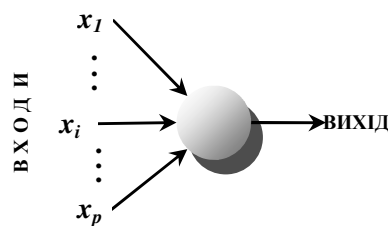


Рис. 2.20. Схематична модель ШН

Математична модель нейрона має вид:

$$\begin{cases} NET = \sum_{i=1}^P w_i x_i, \\ OUT = F(NET - \theta), \end{cases} \quad (2.24)$$

де NET – зважена сума вхідних сигналів;

w_i – вага синапсу, $i=0, 1, 2, \dots, p$;

x_i – компонента вектору вхідного сигналу, $i=1, 2, \dots, p$;

p – число входів нейрона;

θ – значення зсуву;

OUT – вихідний сигнал нейрона;

F – нелінійний перетворювач, що реалізує функцію активації $OUT = f(NET)$.

Паралельні зв'язки ШН, що характеризуються синаптичними вагами, утворюють ШНМ, яка має багатоварову структуру [2, 86 – 91].

У пропорованих ШНМ ШН пов'язані таким чином, що виходи одних поєднані із входами інших ШН (рис. 2.21).

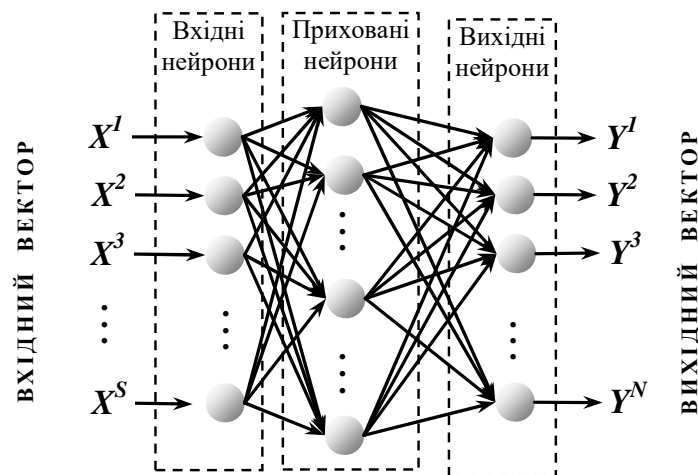


Рис. 2.21. Схематична модель ШНМ

Загалом ШНМ це динамічна система з топологією направленою графа, яка може виконувати переробку інформації шляхом зміни свого стану у відповідь на постійний або імпульсний вхідний сигнал.

Всі ШН, в залежності від розташування і виконуваних функцій поділяються на три типи: вхідні, на які подається вектор вхідного впливу, вихідні, значення яких є виходами пропорованих ШНМ та приховані, що є основою пропорованих ШНМ. Відповідно архітектурно пропоровані ШНМ містять три основні частини [2, 86 – 91]:

1. *Вхідний шар* нейронів, на який подається інформація у вигляді так званого вхідного вектора. Причому у вхідному шарі, як правило, не здійснюються обчислювальні процедури і інформація передається з входу на вихід ШН шляхом зміни його активації;

2. *Прихований шар* ШН, який виконує проміжкову передобробку

інформації таким чином, що на вихідний шар ШН подаються лінійно-розділені множини;

3. Вихідний шар ШН, вихідні значення яких являють вихід ШНМ.

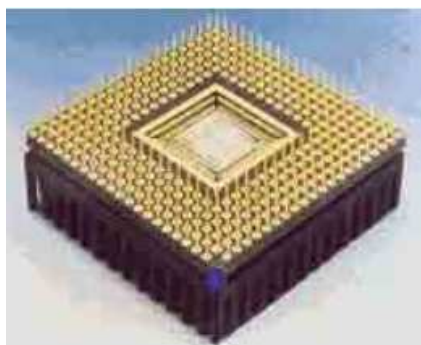
При функціонуванні пропонованих ШНМ у них здійснюється перетворення вхідної інформації, в результаті чого деякі параметри x_1, \dots, x_n , представлені у вигляді так званих вхідних векторів $X = \{x_1, \dots, x_n\}$, перетворюються у вихідний сигнал OUT , що представляється вектором $Y = \{y_1, \dots, y_m\}$.

Загалом ШНМ дозволяють вирішувати різні задачі, що складно формалізуються, вони здатні успішно працювати в умовах неповної, суперечливої, швидко змінюваної інформації. ШНМ здатні до швидкого навчання та перенавчання. Тому на сьогодні ШНМ широко застосовують у різних галузях людської діяльності [86, 87].

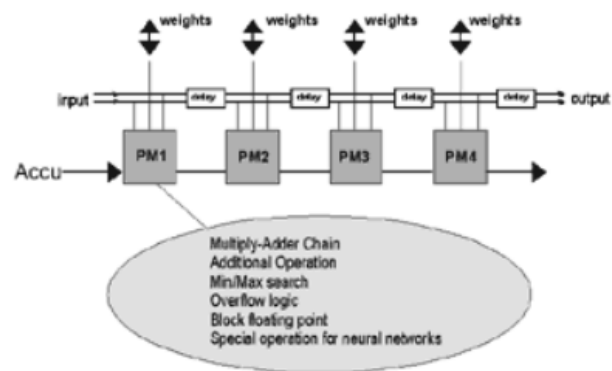
Практична реалізація ШНМ здійснюється апаратно у вигляді нейрокомп'ютерів (рис. 2.22), нейропроцесорів, нейрочипів (рис. 2.23) або програмно у вигляді нейроімітаторів – спеціальних комп'ютерних програм (рис. 2.24).



Рис. 2.22. Нейрокомп'ютер “Синапс-1” фірми Siemens створений при співробітництві з Мангеймським університетом [87]



а



б

Рис. 2.23. Нейрочип MA16 (Siemens): а – зовнішній вигляд, б – функціональна схема

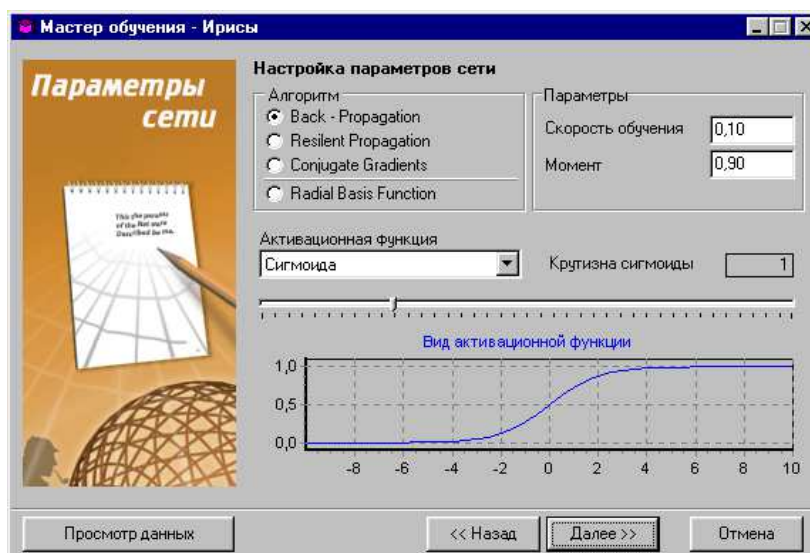


Рис. 2.24. Экранна копія процесу моделювання ШНМ в нейроімітаторі Neural Analyzer аналітичного пакету Deductor Professional [87]

На сьогодні значна частка всіх досліджень в галузі створення ШНМ припадає саме на використання їх програмних моделей. Вказане обумовлюється тим, що розробка нейроімітаторів є більш дешевим процесом ніж створення відповідної спеціалізованої апаратури – нейрокомп'ютерів, нейропроцесорів, нейрочипів, а одержуваний продукт є більш наочним, мобільним та зручним [87]. Тому практична реалізація пропонованих ШНМ, зокрема ШНМ для автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання та ШНМ для автоматичного розпізнавання хімічних елементів в складі пропонованої ППСВК, здійснена з використанням нейроімітатора Neural Analyzer аналітичного пакету Deductor Professional (Lite-версії), що інтегрується як спеціалізований програмний додаток в операційну систему комп'ютера.

Висновки до розділу 2

1. Теоретично узагальнено підходи до підвищення точності та швидкодії вимірювання кутів, виокремлено нові методи та засоби – штучні нейронні мережі та КМОП-матрицю, синергетична інтеграція яких в складі пропонованої ППСВК дозволить підвищити точність та швидкодію вимірювання до масштабів реального часу, а також розширити функціональні можливості пропонованої ППСВК порівняно із відомими.

2. Обґрунтовано сукупність принципів побудови пропонованої ПСВК, комплексне дотримання яких дозволить отримати якісно нову вимірювальну

систему підвищеної точності та швидкодії порівняно із відомими.

3. Побудовано системну модель пропонованої ППСВК на базі фізичних законів та гіпотез про її структурованість та функціональність, а також з дотриманням сформульованих принципів. Системна модель пропонованої ППСВК описана на структурному та інформаційному абстрактному рівнях, що дозволило визначити склад функціонально сумісних технічних засобів для вимірювання кутів з підвищеною точністю та швидкістю.

Література до розділу 2

1. Томашевский В. М. Моделирование систем / В. М. Томашевский. – К.: Видавнича група BHV, 2005. – 352 с.
2. Черепанська І. Ю. Теорія і принципи побудови автоматизованої системи для лінійних і кутових переміщень об'єктів виробництва з використанням математичного апарату кватерніонів і елементів штучного інтелекту. Монографія / І. Ю. Черепанська, В. А. Кирилович, О. М. Безвесільна, А. Ю. Сазонов. – Житомир: ЖДТУ, 2016. – 326 с.
3. Черепанська І. Ю. Автоматизація процесу керування вибором пристроїв орієнтування при проектуванні гнучких інтегрованих систем: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07 "Автоматизація процесів керування" / Ірина Юріївна Черепанська. – Київ., 2008. – 380 с.
4. Деклар. пат. 53171 А; МПК: G01B 11/26, G01B 9/10. Спосіб вимірювання кутів за допомогою гоніометра / Безвесільна О. М., Зайцев Ю. І., Старцев С. М., Янчук О. М.; заявник і патентоутримувач Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". – 2002032422; заявл. 27.03.2002; надр. 15.01.2003, Бюл. №1.
5. Деклар. пат. 52133 А; МПК: G01B 9/00, G01B 9/10, G01C 1/00. Гоніометр / Тулупов Д. Г., Безвесільна О. М.; заявник і патентоутримувач Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". – 2002021618; заявл. 27.02.2002; надр. 16.12.2002, Бюл. №12.
6. Кондратов В. Т. Разработка концепции построения и архитектуры измерительных систем и приборов для экспресс-диагностики состояния физических и биологических объектов Сообщение 3 // Вісник Хмельницького

національного університету. – №6. – 2014 (219). – С. 265 – 261

7. Зайченко С. Н., Перцовский М. И. Современная архитектура построения интегрированных статодинамических модульных информационно – измерительных систем комплексных испытаний авиационной и ракетно-космической техники // Журнал «Информатизация и Системы Управления в Промышленности». – № 4(24). – 2009. – [Электронный ресурс]. – <http://isup.ru/articles/16/408/> (дата звернення 19.06.2018)

8. Ураксеев М. А., Закурдаева Т. А. Принципы построения и конструирования электрооптических измерительных систем // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – №4 (11). – 2015. – С. 115 – 124.

9. Информационные системы в мехатронике и робототехнике: Учебное пособие / В. В. Гнилицкий, О. И. Лисовиченко, В. П. Пасько, П. М. Повидайко, А. Ю. Сазонов, Б. Б. Самошкин, М. М. Ткач; под. общ. Редакцией Б. Б. Самошкина. – Житомир: ЖГТУ, 2014. – 265 с.

10. Ting – Yen Chang, Yunn – Shiuan Liao and Wei – Cheng Liu Development of a micro hole measuring system based on the capacitance principle // Measurement Science and Technology. – V. 20. – N. 10. – 2009. – <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/20/10/105104> (дата звернення 19.06.2018)

11. Weizhi Zheng; Jinyu Liu; Xiaolan He; Ruilong Li Development and Study on the Measurement System of Automobile ABS Tester Based on the Virtual Instrument // International Conference on E – Product E – Service and E – Entertainment. – 2010. – <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5660540/> (дата звернення 19.06.2018)

12. Kamil Zidek, Miroslav Dovica, Ondrej Liska Angle Measuring by Mems Accelerometers // Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems. – Volume 6. – N°4. – 2012. – pp. 3 – 6

13. D. Piyabongkarn ; R. Rajamani ; M. Greminger The development of a MEMS gyroscope for absolute angle measurement // IEEE Transactions on Technology Systems Technology. – Volume 13. – Issue 2. – March 2005. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1397754/> (дата звернення 19.06.2018)

14. M N Burnashev, P A Pavlov and Yu V Filatov Development of precision laser goniometer systems // Kvantovaya Elektronika and Turpion Ltd. – Volume 43. – Number 2.

– 2013. <http://iopscience.iop.org/article/10.1070/QE2013v043n02ABEH015045/meta> (дата звернення 19.06.2018)

15. E.G. Quate ; K.G. Wika ; M.A. Lawson ; G.T. Gillies ; R.C. Ritter ; M.S. Grady ; M.A. Howard Goniometric motion controller for the superconducting coil in a magnetic stereotaxis system // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – Volume: 38. – Issue: 9. – Sept. 2011. <https://ieeexplore.ieee.org/document/83610/> (дата звернення 19.06.2018)

16. Irina Cherepanska, Elena Bezvesilna, and Artem Sazonov Artificial Neural Network as a Basic Element of the Automated Goniometric System / Recent Advances in Systems, Control and Information Technology. 2016. p 43 – 52.

17. Патент на корисну модель 124155 (Україна), МПК: G 01 B 21/22 (2006.01). Спосіб вимірювання кутів / І.Ю. Черепанська, О.М. Безвесільна, А.Ю. Сазонов. – Реєстрац. номер заявки u 2017 09792. Заявл. 09.10.2017; Надр. 26.03.2018, Бюл. №6.

18. Патент на корисну модель 127373 (Україна), МПК: G 01 B 21/22 (2006.01). Інтелектуальна система вимірювання кутів / І.Ю. Черепанська, О.М. Безвесільна, А.Ю. Сазонов. – Реєстрац. номер заявки u 2018 02424. Заявл. 12.03.2018; Надр. 25.07.2018, Бюл. №14.

19. Cherepanska I. Automated technological complex to precise angles measurement based on goniometer / I. Cherepanska, E. Bezvesilna, A. Sazonov, A. Lavrishev // Technological Complexes. – 2015. –№ 1/2 (12). P. 38 – 45.

20. Practical Design Techniques For Sensor Signal Conditioning / Analog Devices. – Prentice Hall, 1999. – 366 p.

21. M. N. Libenson, E. B. Yakovlev, G. D. Shandybina, Vzaimodejstvie lazernogo izlucheniya s veshestvom (silovaya optika), SPb: SPb GU ITMO, 2008, 141 s.

22. Шульц Ю. Электроизмерительная техника: 1000 понятий для практиков. Справочник: Пер. с нем. / Ю. Шульц. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 288 с.

23. Фарзани Н. Г. Автоматические детекторы газов и жидкостей / Н. Г. Фарзани, Л. В. Илясов, А. Ю. Азим-Заде. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 96 с.

24. Левшина Е. С. Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи / Е. С. Левшина, П. В. Новицкий. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.

25. Шарапов В. М. Пьезоэлектрические датчики / В. М. Шарапов,

М. П. Мусиенко, Е. В. Шарапова – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.

26. Полищук Е. С. Измерительные преобразователи / Полищук Е. С. – Киев: Вища школа, 1981. – 296 с.

27. Засоби та методи вимірювань неелектричних величин: підруч. / Є. С. Поліщук, М. М. Дорожовець, Б. І. Стадник, О. О. Івахів; за ред. Є. С. Поліщука; МОН України. Ін – т інновац. технологій і змісту освіти. – Львів: Бескид Біт, 2008. – 618 с.

28. Зарипов М. Ф. Датчики малых угловых скоростей. / М. Ф. Зарипов – Уфа: Изд. Уфимского авиационного института, 1975.

29. Хомерики О. К. Гальваномангнитные элементы и устройства автоматики и вычислительной техники. / О. К. Хомерики – М.: Энергия, 1975. – 176 с.

30. Храмов А. В. Первинні вимірювальні перетворювачі вимірювальних приладів і автоматичних систем. – Київ, Вища школа, 1998. – 527 с.

31. Шарапов В. М. Датчики: Справочное пособие / В. М. Шарапов, Е. С. Полищук, Н. Д. Кошевой, Г. Г. Ишанин, И. Г. Минаев, А. С. Совлуков. – Москва: Техносфера, 2012. • 624 с.

32. Аш Ж. Датчики измерительных систем. Пер. с. франц. / Ж. Аш, П. Андре, Ж. Бофрон, П. Дегут и др. – М.: Мир, 1992. – 480 с.

33. Емкостные датчики. Датчики и сенсоры он-лайн журнал: Практика использования, теоретические основы и современные тенденции. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://datchikisensor.narod.ru/068.html>

34. Седалищев В. Н. Методы и средства измерений неэлектрических величин / В.Н. Седалищев. – Барнаул: АлтГТУ, 2008. – 392 с.

35. Назначения емкостного датчика. ООО “Промышленная Автоматизация Тольятти”, 2010., [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://pat63.ru/stati_timer_rele_reduktor/nazn_emkostn_datch.html

36. Техника конструирования и применения емкостных датчиков (общие данные). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://guarda.ru/capacity/14/>

37. Дж. Фрайден Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден. – Москва: Техносфера, 2005. – 592 с.

38. Practical Design Techniques For Sensor Signal Conditioning / Analog Devices. – Prentice Hall, 1999. – 366 p.

39. Применения лазеров / Под ред. д.т.н, В. П. Тычинского. – М.:

Мир, 1974. – 445 с.

40. Вангорихин А. И. Автоматизированный гониометр на основе кольцевого лазера / А. И. Вангорихин, И. И. Зайцев. – “ОМП”, 1982, – № 9.

41. Кудрявцев В. Б. Прецизионные частотные преобразователи автоматических систем контроля и управления / В. Б. Кудрявцев, А. П. Лысенко, Н. Т. Милохин, И. М. Тищенко. – М.: Энергия, 1974. – 336 с.

42. Быганян Д. А. Поворотный индуктосин / Д. А. Быганян, И. Я. Гольдман. – Л.: Энергия, 1969. – 100 с.

43. Aronowitz F. Single – isotope laser gyro. – Appl.Opt., 1972. – Vol. 2. – №2. – P.405 – 412.

44. Савельев А. М., Соловьева Т. И. Состояние лазерной гироскопии за рубежом. – Зарубежная радиоэлектроника, – 1981. – № 8. – С. 77 – 92.

45. Lamazze J.M., Roband I.J. Goniometric par gyrometre laser. – Jonale Electrique. – 10, Nov. 1970. – Vol.50. – P. 869 – 871.

46. Пат. №1623406 [ФРГ] Laser – Goniometr. I.Catherin J.M., Pessus B. – An.1418.1967.

47. Преснухин Л. Н. Фотоэлектрические преобразователи информации / Л. Н. Преснухин, В. Ф. Шаньгин, С. А. Майоров, И. В. Меськин. – М.: Машиностроение, 1974. – 376 с.

48. Батраков А. С. Лазерные измерительные системы / А. С. Батраков, М. М. Бутусов, Г. П. Гречка и др. – М.: Радио и связь. 1981. – 456 с.

49. Filatov Yu.V., Loukianov D.P. and Probst R. Dynamic Angle Measurement dy Means of a Ring Laser, Metrologia, 1997. – № 34. – P.343 – 351.

50. Optikal Gyros and their Applikation, Published May 1993, edited bi D.Ljukifnov, R.Rjdloff, H.Sjrg, B.Stieler.

51. Ванюрин А. И., Зайцев И. И. Автоматизированный гориометр на основе кольцевого лазера. Оптико-механическакая промышленность, 1982. – № 9, С. 28 – 31. (Soviet Journal of Optical Technology).

52. Система углоизмерительная ГСІЛ. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Украина. КП СІБ “Арсенал”.

53. Гафанович Г. Я., Гацкалова Т. Г., Купко В. С. и др. Эталоны в области геометрических измерений. Український метрологічний журнал. – 1996. –

№ 4. – С. 50 – 56.

54. Артемьев И. М., Блантер Б. Э., Ковчин С. А. и др. Комплекс эталонных и образцовых средств для воспроизведения постоянных и низкочастотных линейных ускорений. – Труды метрологич. ин-тов СССР, 1977. – Вып. 205, – С. 3 – 7.

55. Demchuk V. Y. Ring Laser for Angle Measurement Devices Demchuk / V. Y. Demchuk, I.I. Zaytsev, L.G. Zozulya, E.N. Bezvesilnaya, Y.I. Zaytsev // Ukrainian Journal of Physical Optics, 2002. – Vol 3. – № 3. – P. 206 – 210.

56. Лукьянов Д. П. 50 лет лазерному гироскопу / Д. П. Лукьянов, Ю. В. Филатов, Ю. Д. Голяев, В. Н. Курьятов, Т. И. Соловьева и др. // Фотоника – 2014. – №1/43. – С. 42 – 61 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.photonics.su/files/article_pdf/4/article_4049_770.pdf

57. Привалов В. Е. Кольцевой газовый лазер / В. Е. Привалов, С. А. Фридрихов. // Успехи физических наук, 1969. – 377 с.

58. Померанцев Н. М. Физические основы квантовой гироскопии / Н. М. Померанцев, Г. В. Скороцкий. // Успехи физических наук, 1970. – 361 с.

59. Королев А. Н. Цифровой автоколлиматор / А. Н. Королев, А. И. Гарцуев, Г. С. Полищук, В. П. Трегуб // Оптический журнал. – 2009. – №10(76). – С. 42 – 47.

60. TriAngle Electronic Autocollimator. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.trioptics.com/>

61. Vermont Photonics. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.vermontphotonics.com/products/>

62. 3DNews Daily Digital Digest. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://3dnews.ru/about>

63. Овчинников А. М. Принцип работы и устройство активно-пиксельных датчиков / А. М. Овчинников, А. А. Ильин, М. Ю. Овчинников. – М., 2003. – 30 с.

64. Кирилович В. А. Автоматизированный синтез роботизованных механоскладальных технологий: автореф. дис. ... д-ра т. наук: 05.02.08 “Технологія машинобудування” / В. А. Кириллович. – Київ, 2015. – 48 с.

65. Шевчук В. П., Капля В. И., Желтоногов А. П., Лясин Д. Н.. Метрология интеллектуальных измерительных систем: монография. ВолгГТУ, Волгоград, 2005. – 210 с.

66. Агапов М. Ю. Разработка и исследование гониометрических систем контроля преобразователей угла: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.11.16 “Информационно – измерительные и управляющие системы (приборостроение)” / Михаил Юрьевич Агапов. – Санкт-Петербург, 2009. – 17 с.

67. Барина Е. А. Разработка и исследование методов повышения точности гониометрических систем: дис. канд. техн. наук: 05.11.16 “Информационно-измерительные и управляющие системы (приборостроение)” / Елена Анатольевна Барина. – Санкт-Петербург, 2009. – 167 с.

68. Береза Б. В. Разработка и исследование лазерной гониометрической системы контроля средств измерений угловых параметров движения: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: 05.13.14 “Системы обработки информации и управления” / Борис Владиленович Береза. – Санкт-Петербург, 1993. – 20 с.

69. Гончаров Н. В. Разработка и исследование динамического гониометра на основе фотоэлектрического преобразователя угла: дис. канд. техн. наук: 05.11.16 “Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям)” / Никита Викторович Гончаров. – Санкт-Петербург, 2005. – 125 с.

70. Павлов П. А. Разработка и исследование высокоточных лазерных гониометрических систем: дис. доктора техн. наук: 05.11.16 “Информационно-измерительные и управляющие системы (приборостроение)” / Петр Алексеевич Павлов – Санкт-Петербург, 2008. – 280 с.

71. Сушков А. С. Разработка средств и методов высокоточных интерференционных угловых измерений в геодезии : дис. канд. техн. наук : 05.24.01 “Геодезия” / Аркадий Сергеевич Сушков. – М., 1984. – 127 с.

72. Кирилович В. А. Принципи автоматизованого синтезу роботизованих механоскладальних технологій на відомому технічному базисі гнучких виробничих комірок / В. А. Кирилович // Вісник Державного технологічного університету. – 2011. – № 3(58). – С. 33 – 47.

73. Иванов С. Ю. Проявление основных законов диалектики в научном познании / С. Ю. Иванов // Вестник ОГУ. – 2008. – №7 (89). – С. 75 –79.

74. Неєжмаков П. І. Науково-технічні засади перебудови еталонної бази України у відповідності до реформи міжнародної системи одиниць (SI): автореф. дис. д-ра т. наук: 05.01.02 “Стандартизація, сертифікація та метрологічне

забезпечення” / П. І. Неєжмаков. – Львів, 2014. – 43 с.

75. M. N. Libenson, E. B. Yakovlev, G. D. Shandybina, *Vzaimodejstvie lazernogo izlucheniya s veshchestvom (silovaya optika)*, SPb: SPb GU ITMO, 2008, 141 s.

76. R. I. Filyaevskih, M. A. Gan, *Videocifrovaya sistema opticheskogo refraktometra*, [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu: <http://docplayer.ru/32750438> – Videocifrovaya – sistema – opticheskogo – refraktometra.html

77. K. Rehan, I. Rehan, S. Sultana, M. Zubair Khan, Z. Farooq, A. Mateen, and M. Humayun *Determination of Metals Present in Textile Dyes Using Laser – Induced Breakdown Spectroscopy and Cross – Validation Using Inductively Coupled Plasma, Atomic Emission Spectroscopy*, *International Journal of Spectroscopy*. – Volume 2017, Article ID 1614654, 9 pages <https://doi.org/10.1155/2017/1614654>

78. Francesco Capitelli, M. R Provenzano, Francesco Colao, Nicola Senesi *Determination of heavy metals in soils by Laser Induced Breakdown Spectroscopy*, *Geoderma* 106(1): 45–62, 2018, Article in · March 2002 DOI: 10.1016/S0016 – 7061(01)00115 – X

79. Direct industry: Onlajn vystavka promyshlennoj produkcii. Programmnoe obespechenie dlya spectrometrov, [Web resource]. – Access: <http://www.directindustry.com.ru/proizvoditel> – promyshlennyj/programmnoe – obespechenie – spektrometrov – 109161.html

80. Programmnoe obespechenie CATO, [Web resource]. – Access: <http://www.sp-an.com/software.htm>

81. Безвесільна О. М. Автоматизований прецизійний пристрій для вимірювання кутів: Монографія. – Житомир: ЖДТУ, 2010. – 258 с.

82. Филатов Ю. В. Методы и средства лазерной гониометрии: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.11.07 “Оптические и оптико-электронные приборы” / Филатов Юрий Владимирович – Ленингр. ин – т точной механики и оптики. Л.: Изд – во ЛИТМО, 1991. – 32 с.

83. Греченева А. В. Фазометрический метод гониометрического контроля на базе акселерометрических преобразователей: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.11.13 “Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий” / Греченева Анастасия Владимировна – Белгород. – 2019. – 25 с.

84. Николаев М. С. Разработка и исследование методов измерения

межгранных углов прозрачных призм на основе динамического гониометра: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.11.16 “Информационно – измерительные и управляющие системы (приборостроение)” / Николаев Максим Сергеевич – Санкт-Петербург. – 2012. – 25 с.

85. Иващенко Е. М. Разработка методов исследования динамических гониометров для калибровки преобразователей угла: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: 05.11.16 “Информационно-измерительные и управляющие системы (приборостроение)” / Елена Михайловна Иващенко. – СПб., 2013. – 17 с.

86. Черепанська І. Ю. Штучні нейронні мережі для вирішення задач технологічної підготовки гнучкого виробництва: монографія. Монографія / І. Ю. Черепанська, О. М. Безвесільна, А. Ю. Сазонов. – Київ: ДП “НВЦ “Пріорітети”, 2018. – 192 с.

87. Технології штучного інтелекту та основи машинного зору в автоматизації: теорія та практика. / А.І. Жученко, І.Ю. Черепанська, А.Ю. Сазонов, Д.О. Ковалюк – КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 386 с.

88. Анил К. Джейн. Введение в искусственные нейронные сети: [пер. с англ.] / Анил К. Джейн. – Мичиганский государственный университет, США, 1996. – 144 с.

89. Дьяконов В. П. Matlab 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2 + Simulink 5/6. Инструменты искусственного интеллекта и биоинформатики / В. П. Дьяконов, В. В. Круглов. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2006. – 456 с.

90. Заенцев И. В. Нейронные сети: основные модели / И. В. Заенцев. – Воронеж: „Воронеж”, 1999. – 76 с.

91. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: теория и практика [пер. с англ.] / Ф. Уоссермен. – М.: Мир, 1992. – 183 с.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПОХИБКИ ПРЕЦИЗІЙНОЇ ПРИЛАДОВОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ

3.1. Аналіз відомої математичної моделі похибки автоматизованого прецизійного пристрою для вимірювання кутів

Пропонованій ППСВК властиві всі види похибок, що визначаються загальноприйнятою класифікацією (рис. 3.1).

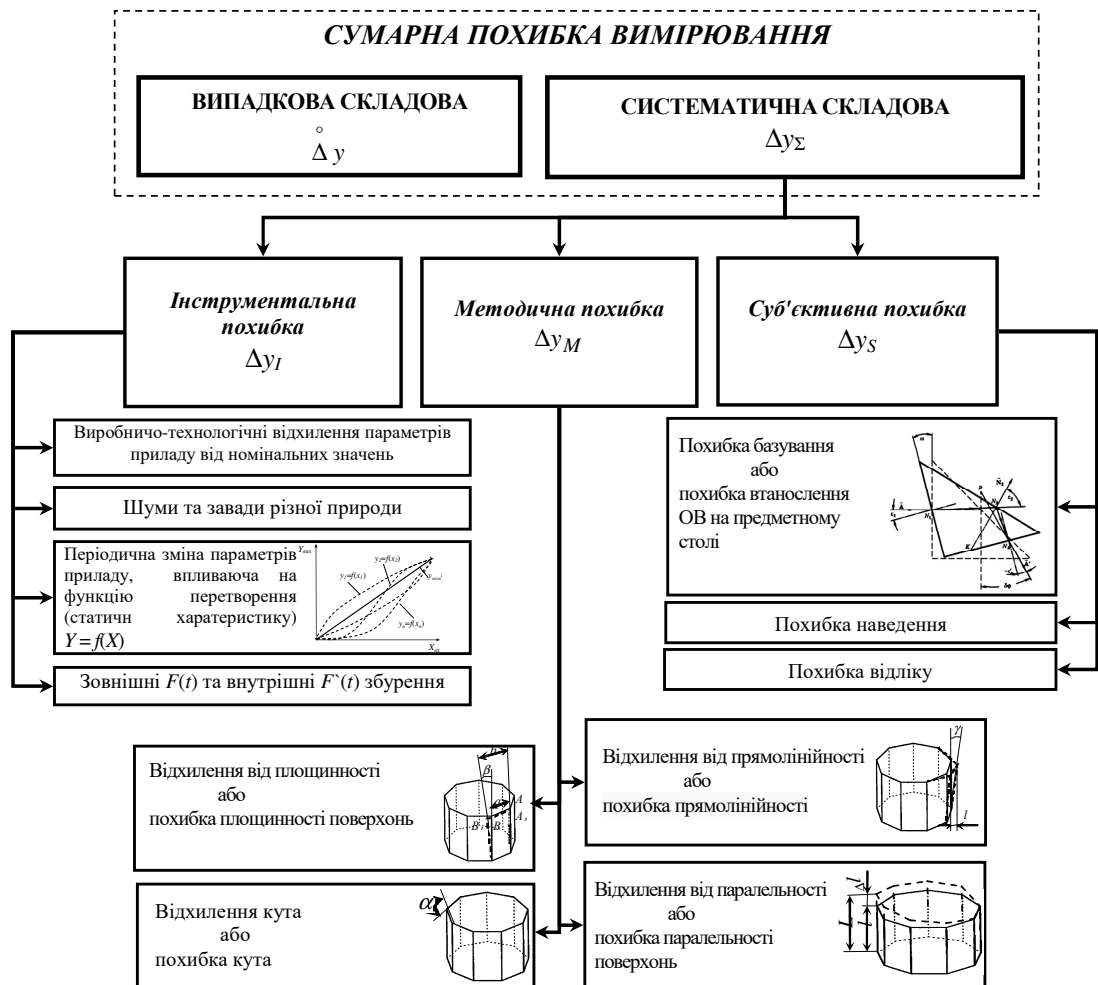


Рис. 3.1. Складові похибки вимірювання пропонованої ППСВК

Зокрема, похибка вимірювання має систематичну та випадкову складові, зміна яких в часі являє собою нестационарний випадковий процес [1]. Аналіз інформаційних джерел [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8], у яких в той чи інший спосіб описують похибки приладових систем, зокрема динамічних гоніометрів, до групи яких можна в деякій мірі віднести пропоновану ППСВК за принципами вимірювання,

що здійснюються оптичними методами на основі закону прямого поширення світла та законів відбиття світла, вказує що жодне із відомих інформаційних джерел не містить математичну модель похибки приладової системи, яка може бути використана без суттєвого доопрацювання в якості математичної моделі похибки пропонованої ППСВК.

Необхідність побудови математичної моделі похибки пропонованої ППСВК обумовлюється синергетичною інтеграцією у структуру пропонованої ППСВК, що побудована на базі відомої прецизійної гоніометричної системи ГС1Л КП СПБ “Арсенал”, нових технічних засобів – фоточутливої КМОП матриці та ШНМ (у випадку реалізації останньої у вигляді нейропроцесора). Математична модель похибки використовується для обчислення величини похибки з наступним відніманням із результату вимірювання в під час функціонування пропонованої ППСВК.

Очевидно, що побудова повної математичної моделі похибки передбачає опис похибок складових елементів пропонованої ППСВК.

В роботі [2] наведено математичну модель (див. вираз (3.1)) похибки автоматизованого прецизійного пристрою для вимірювання кутів, побудованого на базі гоніометричної системи ГС1Л, що є прототипом пропонованої ППСВК.

$$\Delta\varphi = f(\Delta\varphi_I; \Delta\varphi_M; \Delta\varphi_S) = \left(2\pi \frac{\int_{t_1}^{t_\varphi} \left[K(t)\omega_\Sigma(t)\cos\alpha(t) + \frac{K_{-1}(t)}{\omega_\Sigma(t)\cos\alpha(t)} + \omega_0(t) \right] dt + N_{q1}}{\int_{t_1}^{t_{2\pi}} \left[K(t)\omega_\Sigma(t)\cos\alpha(t) + \frac{K_{-1}(t)}{\omega_\Sigma(t)\cos\alpha(t)} + \omega_0(t) \right] dt + N_{q2}} + \Delta\varphi_{cal} \right) - \varphi, \quad (3.1)$$

де $\Delta\varphi$ – похибка вимірювання кутів;

$\Delta\varphi_I$ – інструментальна похибка;

$\Delta\varphi_M$ – методична похибка повірки гоніометра;

$\Delta\varphi_S$ – суб’єктивна похибка оператора;

$t_1, t_\varphi, t_{2\pi}$ – моменти часу початку вимірювання, повороту на вимірюваний

кут φ та кут 2π відповідно, що зафіксовані автоколіматором;

$K(t)$ – масштабний коефіцієнт КЛ, що використовується в якості датчика кута;

ω_{Σ} – кутова швидкість, що впливає на гоніометр;

$\alpha(t)$ – кут між віссю обертання обертового пристрою і віссю чутливості гоніометра;

$K_{-1}(t), \omega_0(t)$ – нелінійність і зсув нуля вихідної характеристики КЛ відповідно;

N_{q1}, N_{q2} – шум і дискретність квантування сигналу;

$\Delta\varphi_{cal}$ – похибка обчислень значень вимірюваного кута ПК;

φ – дійсне значення вимірюваного кута.

В математичній моделі похибки за виразом (3.1) в роботі [2] враховано вплив різного роду кутових швидкостей, зокрема кутової швидкості обертання платформи поворотного пристрою ($\overline{\omega}(t)$), обертання Землі ($\overline{\omega}_3$), обертання основи платформи поворотного пристрою відносно Землі ($\overline{\omega}_{bas}(t)$).

Сумарний вплив кутових швидкостей різного роду на прилад записаний наступним виразом [2]:

$$\overline{\omega}_{\Sigma}(t) = \overline{\omega}(t) + \overline{\omega}_e + \overline{\omega}_{bas}(t), \quad (3.2)$$

де $\overline{\omega}_{\Sigma}(t)$ – сумарна кутова швидкість від кутових швидкостей різного роду, що впливає на точність вимірювання пропонованої ППСВК;

$\overline{\omega}(t)$ – кутова швидкість обертання платформи поворотного пристрою;

$\overline{\omega}_3$ – кутова швидкість обертання Землі;

$\overline{\omega}_{bas}(t)$ – обертання основи платформи поворотного пристрою відносно Землі ($\overline{\omega}_{bas}(t)$).

Кутова швидкість обертання платформи поворотного пристрою описана наступним виразом [2]:

$$\overline{\omega}(t) = \overline{c} [\omega_0 + \omega_1 t + \omega_{del}(t) + \omega_{\xi}(t) + \omega_{\xi}], \quad (3.3)$$

де \overline{c} – одиничний вектор;

ω_0 – постійна складова кутової швидкості;

ω_1 – коефіцієнт лінійного дрейфу;

$\omega_{\text{det}}(t)$ – детермінована складова кутової швидкості (наприклад, синусоїдальні коливання);

$\omega_{\xi}(t)$ – випадкова складова кутової швидкості (випадковий процес);

ω_{ξ} – зміщення величини кутової швидкості між вмиканнями приладу, що є випадковим процесом.

Зміна кута положення основи гоніометра, зокрема величина кута між віссю обертання поворотного пристрою і віссю чутливості лазерного гіроскопа представлена наступним виразом [2]:

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_{\xi}(t), \quad (3.4)$$

де α_0 – постійне відхилення;

$\alpha_{\xi}(t)$ – стаціонарний Гаусовський процес з математичним очікуванням $M[\alpha_{\xi}(t)] = 0$ і дисперсією $D[\alpha_{\xi}(t)] = \sigma_{\alpha}^2$.

Крім того в роботі [2] досліджено параметри дрейфу вихідної характеристики лазерного гоніометра. На основі цього вказано, що у випадку застосування гоніометрів в специфічних умовах (наприклад, при малому часі вимірювання, застосуванні методу самокалібрування, зовнішніх впливів з різкою зміною параметрів і т.д.) масштабний коефіцієнт описують виразом:

$$K(t) = K_0 + K_2 t + K_{\xi}(t), \quad (3.5)$$

де K_0 – постійна складова масштабного коефіцієнта;

K_2 – Гаусовська випадкова величина;

$K_{\xi}(t)$ – стаціонарний Гаусовський процес з математичним очікуванням

$$M[K_{\xi}(t)] = 0 \text{ і дисперсією } D[K_{\xi}(t)] = \sigma_K^2.$$

Параметри $K_{-1}(t)$ і $f_0(t)$ вихідної характеристики гоніометра, що визначають нелінійність і зсув нуля відповідно при вимірюванні прийнятні постійними величинами [2]:

$$K_{-1}(t) = K_{-1}; \quad f_0(t) = f_0. \quad (3.6)$$

В роботі [2] наведено похибку обчислень значень вимірюваного кута ПК

$\Delta\varphi_{cal}$. Виміряні кути φ_i при відліку кутів, наприклад, від базової грані призми обчислюються ПК за формулою:

$$\varphi_i = 2\pi \frac{N_{i-1} + N_i}{N_{n-1} + N_n} = 2\pi \frac{N_\varphi}{N_{2\pi}} \quad (3.7)$$

$$N_{i-1} = 0 \quad \text{при } i = 1,$$

де i – номер вимірюваного кута;

N, N_i, N_{i-2} – множина чисел, що отримується за один повний оберт обертового пристрою пропонованої ППСВК:

$$N = \{N_i, | i = \overline{1, n} \};$$

$$N_i = N_{i-2} + \int_{t_i}^{t_{i+1}} f_{Gout}(t) dt, \quad (3.8)$$

де i – порядковий номер числа, що відповідає порядковому номеру грані призми;

n – кількість граней призми;

t_i – час надходження імпульсів автоколіматора від i -ої грані призми,

$t_1, t_2, t_3, \dots, t_{n+1}$ – час надходження імпульсів автоколіматора від 1, 2, 3, $n+1$ грані призми відповідно;

f_{Gout} – частота сигналу від ППК α_m^A пропонованої ППСВК, тобто частота сигналу від гоніометра (див. розділ 2).

Таким чином $N_1 = \int_{t_1}^{t_2} f_{out}(t) dt, \quad N_2 = \int_{t_2}^{t_3} f_{out}(t) dt, \quad N_3 = N_1 + \int_{t_3}^{t_4} f_{out}(t) dt,$

$$N_4 = N_2 + \int_{t_4}^{t_5} f_{out}(t) dt, \quad N_{n-1} = N_{n-3} + \int_{t_{n-1}}^{t_n} f_{out}(t) dt, \quad N_n = N_{n-2} + \int_{t_n}^{t_{n+1}} f_{out}(t) dt.$$

Час t початку або закінчення відліку кутів при вимірюванні записаний у [2] як випадкова величина:

$$t = t_0 + t_{del} + t_\xi, \quad (3.9)$$

де t_0 – точний час формування імпульсів керування лічильником;

t_{del}, t_ξ – детермінована і випадкова складові похибки часу відповідно.

Наведена математична модель має суттєві недоліки, тому, що не враховує

флуктуації, що виникають через наявність у складі автоматизованого прецизійного пристрою для вимірювання кутів фотоелектронного автоколіматора, а також варіативність швидкості осі обертання Землі навколо своєї осі, що має вплив на величину дрейфу нуля КЛ, причому це вплив має переважно випадковий характер.

В роботі [2] враховується лише похибка колімації випромінювання автоколіматора при визначенні кутів багатогранної призми, що виміряні гоніометром з урахуванням детермінованих складових параметрів автоколіматора і контрольованої призми за виразом (3.10):

$$\varphi_i = f[\theta_{x,y}; \eta_{iz,k}; S_i; \ell_{ix,y}] + \Delta\varphi_{in} + \varphi_{uct} , \quad (3.10)$$

де $\theta_{x,y}$ – похибка колімації випромінювання автоколіматора по світловому діаметру по двох осях x, y ;

$\eta_{iz,k}$ – відхилення від площини кожної з i -ї грані призми по двох осях z, k ;

S_i – площа i -ї грані призми;

$\ell_{ix,y}$ – відстань у момент відліку кута від візирної осі автоколіматора до геометричного центру грані призми по осях x, y ;

$\Delta\varphi_{in}$ – детермінована складова похибки, що визначається перетворювачем кута та іншими підсистемами гоніометра, за виключенням автоколіматора;

$\Delta\varphi_{uct}$ – істинне значення кута призми.

Проте необхідно приймати до уваги флуктуації, що обумовлюються тепловим рухом носіїв зарядів (іонів та електронів) провідникових елементів пристрою (так званий тепловий шум) та фотонною структурою електромагнітного випромінювання (так званий дробовий шум). При чому вплив цих флуктуацій на результати вимірювання є значним. Очевидно, що наведена математична модель похибки [2] не може бути повноцінно використана для обчислення величини похибки ППСВК. Проте вона може бути обрана в якості прототипу при побудові математичної моделі похибки пропонованої ППСВК.

В роботі [2] вказано, що при вирішенні практичних задач необхідно використовувати характеристики конкретних складових вимірювальної системи, зокрема враховувати тип обертового пристрою, автоколіматора тощо, що

дозволяє суттєво спростити дану задачу.

З врахуванням конкретних значень отриманих за виразами (3.2) – (3.11) вираз (3.1) може розв'язуватись чисельними методами. Проте оцінка похибки вимірювання кута $\Delta\varphi$ за виразом (3.1) у загальному вигляді є досить складною математичною задачею. Тому при вирішенні практичних задач можна використовувати вираз (3.11):

$$\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0, \quad (3.11)$$

де φ – виміряне значення кута з врахуванням флуктуацій;

φ_0 – істинне значення кута за виразом (2.4) (розділ 2, п. 2.2.2).

При врахуванні впливу швидкості обертання Землі на точність вимірювань КЛ, в роботі [2] вказується, що похибку вимірювання доцільно зменшувати шляхом регулювання кута відхилення вимірювальної осі КЛ від осі обертання Землі (рис. 3.2).

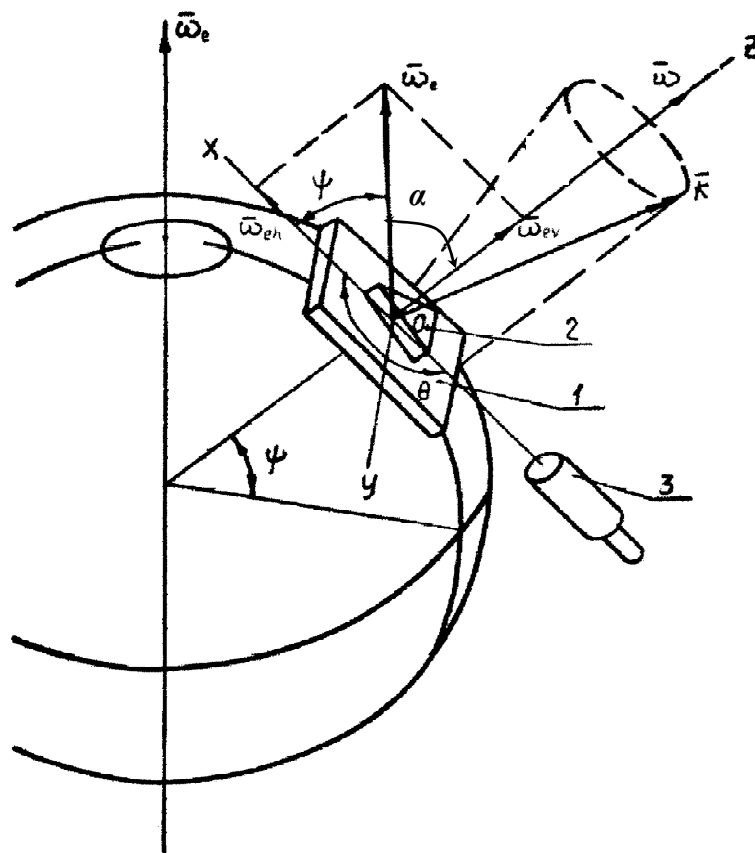


Рис. 3.2. Розташування гоніометру на основі КЛ на поверхні Землі [2]

При отриманні значень α , які прагнуть до нуля суттєво зменшується

похибка вимірювання. Зокрема похибка у залежності від положення приладу відносно осі обертання Землі може мінятися у 2 рази. На рис. 3.3 наведено графік похибки $\Delta\alpha$, обчисленої відповідно виразу (3.16) при $\alpha = 10'$, $\psi = 50^\circ 27'$, $\omega = 1,047 \text{ c}^{-1}$ для точок $\alpha_{\varphi i} = 15^\circ, 30^\circ, \dots, 360^\circ$, де $i = 1, 2, 3, \dots, 24$. Крива 1 побудована при $\theta = 0^\circ$, криві 2, 3 – при $\theta = 90^\circ$ і $\theta = 270^\circ$ відповідно. Граничне відхилення кривих 1, 2, 3 від осі oi визначається кутом θ і може, у залежності від азимута оптичної осі автоколіматора, мінятися у 2 рази [2].

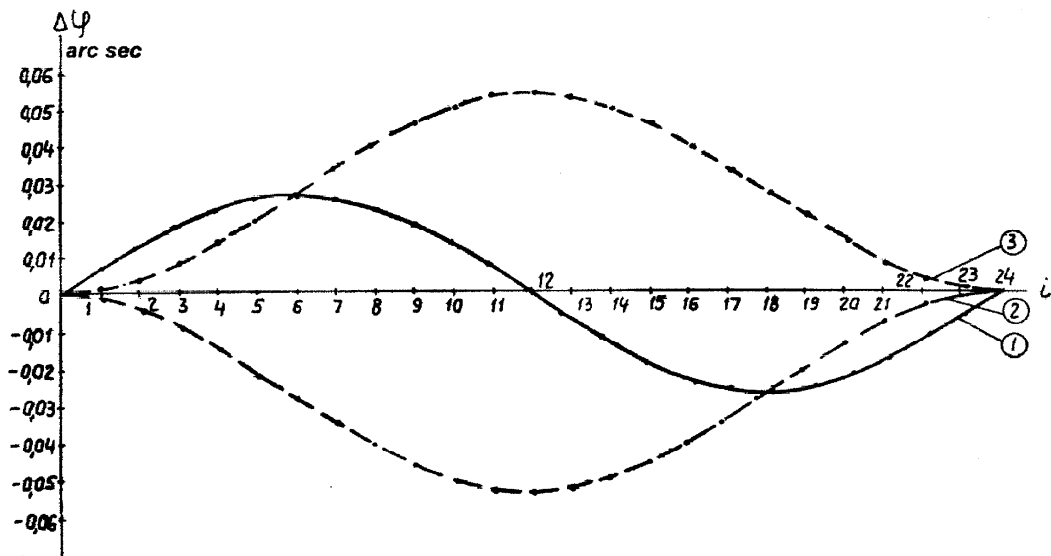


Рис.3.3. Похибка вимірювання, обумовлена кутовою швидкістю обертання Землі [2]

Вираз для похибки вимірювання, обумовленої кутовою швидкістю обертання Землі:

$$\Delta\varphi = A[\sin(\omega_{\varphi 2} + \theta) - \sin \theta],$$

$$A = \frac{\operatorname{tg} \alpha \cos \Psi}{\frac{\omega}{\omega_3} + \sin \Psi}, \quad (3.12)$$

де ψ - географічна широта місця проведення вимірювань;

θ – кут між горизонтальною проекцією вимірювальної осі \overline{K} КЛ і горизонтальною проекцією $\overline{\omega_3}$: $\omega_{eh} = \omega_3 \cos \psi$ (рис. 3.2).

В роботі [2] вказується, що при розташуванні вимірювальної осі КЛ таким чином, що вона буде суміщена з вектором $\overline{\omega}$ з похибкою, яка не

перевищує $1' \dots 5'$, то буде одержана достатньо висока точність вимірювання кутів. Наприклад, при $\alpha = 1'$, $A = 0,0027''$; при $\alpha = 5'$, $A = 0,0013''$. Навпаки у випадку великих значень α похибка різко зростає. Наприклад, для $\alpha = 1^\circ$ похибка становить $A = 0,16''$, що неприпустимо для прецизійних вимірювань.

Проте, необхідно додатково враховувати нестабільність швидкості обертання Землі, що має випадковий характер (див. далі).

3.2. Аналіз похибки фоточутливої КМОП-матриці

Фоточутлива КМОП-матриця, що використовується у пропонованій ППСВК в якості аналізатору сигналу від автоколіматора в діапазоні випромінювань від 400 нм до 1000 мкм має похибку обумовлену шумами. Параметр яким описують відносну величину шуму у сигналі – коефіцієнт шуму, що визначається як відношення величини сигналу S до шуму F вимірюється в децибелах та має логарифмічний масштаб величини:

$$S / F = 10 \log_{10} F . \quad (3.13)$$

У фоточутливій КМОП-матриці виникають фотонний (дробовий) шум, шум темного сигналу, шум зчитування, шум скидання (kTC-шум), що обумовлюють величину похибки.

Фотонний (дробовий) шум виникає в наслідок дискретності природи світлового випромінювання. Він проявляється як випадкові флуктуації напруг U_{dr} та струмів у фоточутливих елементах (пікселях) матриці, що визначають похибку δ_{cmos}^{dr} від дробового ефекту або фотонного шуму $\delta_{cmos}^{dr} = f(U_{dr})$. Переміщення кожного носія заряду (електрона) матриці супроводжується стрибком струму в електричному колі. При швидкості зчитування зарядів до 500 елементів (кадрів) в с., на пікселі матриці потрапляє різна кількість фотонів, яка підпорядковується розподіленню Пуассона.

Середні флуктуаційні напруги, що виникають через дробовий ефект на пікселях матриці визначаються за виразом:

$$U_{dr}^2 = 2qiR^2\Delta f , \quad (3.14)$$

де R – опір, Ом;

Δf – інтервал (смуга) частот в межах якого реєструється сила фотоструму, Гц;

q – заряд електрона, $q=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл;

i – величина струму, А.

Шум темного сигналу (тепловий шум) виникає внаслідок термоелектронної емісії. Тепловий шум виникає тільки в провідниках з активним опором (у провідниках з реактивним опором – ємностях та індуктивностях тепловий шум не виникає) та пов'язаний із хаотичним рухом рухомих носіїв заряду. В наслідок цього з'являються флуктуації напруги U_t , що визначають величину похибки δ_{cmos}^t від теплового шуму $\delta_{cmos}^t = f(U_t)$.

Середній квадрат флуктуаційної напруги при тепловому русі зарядів визначимо за виразом:

$$U_t^2 = 4kTR\Delta f, \quad (3.15)$$

де k – постійна Больцмана, $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;

T – температура, К;

R – опір, Ом;

Δf – інтервал (смуга) частот, Гц.

Відомо, що тепловий шум в постійній смузі частот при $\Delta f = \text{const}$ має лінійну характеристику. На рис. 3.4 приведено графік функції флуктуаційної напруги теплового шуму U_t від абсолютної температури T .

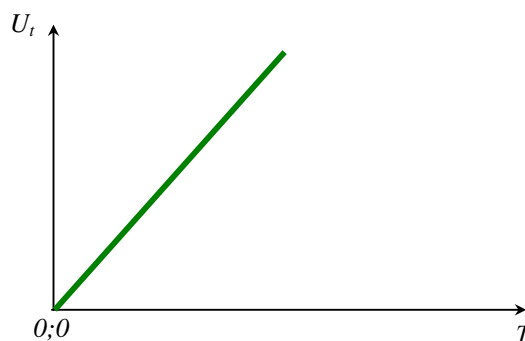


Рис. 3.4. Графік функції флуктуаційної напруги теплового шуму U_t від абсолютної температури T

Очевидно, що тепловий шум описується лінійною функцією виду $f(x) = mx + b$, у прийнятих позначеннях, функція $f(x)$ – флуктуаційна напруга

теплового шуму U_t (В), x – абсолютна температура T (К), m – змінна $k\Delta fR$, b – точка перетину графіка з віссю Y , де величина флуктуаційної напруги дорівнюватиме нулю $U_t=0$ при нульовому значенні абсолютної температури $T=0$.

Розділивши U_t^2 на R отримаємо потужність теплового шуму $P = \frac{U_t^2}{R}$. Тоді вираз (3.19) можна записати наступним чином:

$$P = 4kT\Delta f. \quad (3.16)$$

де P – потужність теплового шуму, Вт;

k – постійна Больцмана, $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;

T – температура, К;

Δf – інтервал (смуга) частот, Гц.

За виразами (3.15) та (3.16), а також з врахуванням графіку на рис. 3.4 на постійній смузі частот можна розрахувати потужність теплового шуму для абсолютно будь якої температури за виразом (3.17):

$$P(T) = 4k\Delta fT + 0 = 4k\Delta fT. \quad (3.17)$$

Очевидно, що зменшити величину теплового шуму можна за рахунок зміни температури: $T \rightarrow 0 \Rightarrow U_t \rightarrow 0: U_t = f(T)$, що відповідно дозволяє зменшити складову δ_{cmos}^t похибки КМОП-матриці від теплового шуму.

З врахуванням виразу (3.17) величину корисного сигналу КМОП матриці визначаємо із співвідношення виразів (3.14) та (3.15) за формулою:

$$S = \frac{U_s^2}{U_{dr}^2 + U_t^2}, \quad (3.18)$$

де U_s^2 – величина напруги на виході КМОП матриці.

Таким чином величина похибки δ_{cmos} , що вносяться КМОП-матрицею буде мати дві складові: похибку від дробового ефекту або фотонного шуму δ_{cmos}^{dr} та похибку від теплового шуму δ_{cmos}^t :

$$\delta_{cmos} = \delta_{cmos}^{dr} + \delta_{cmos}^t. \quad (3.19)$$

За виразами (3.14), (3.15) можна оцінити відносний вплив відповідних складових похибки δ_{mos} на величину корисного сигналу, що визначається за виразом (3.19). При чому фізична природа складових похибки δ_{mos} вказує на її випадковий характер.

3.3. Аналіз впливу швидкості обертання Землі на похибки вимірювання кутів

Відомо, що при функціонуванні будь якого КЛ, в тому числі КЛЗ.970.029, що використовується в складі пропонованої ППСВК в якості прецизійного датчика кута, спостерігається нестабільність його параметрів – відбувається нуля ω_0 вихідної характеристики та дрейф K_1 масштабного коефіцієнта. Розрахункове значення масштабного коефіцієнта становить $K = 1,03 \cdot 10^{-5}$ при довжині сторони резонатора виконаного у вигляді рівностороннього трикутника 22,7 см та довжині хвилі $\lambda = 0,6328$ мкм. Проте під час функціонування КЛ відбувається дрейф масштабного коефіцієнта, що призводить до зміни його точності. В ідеальному випадку масштабний коефіцієнт K змінюється лінійно, але в реальних умовах на лінійні зміни накладаються конструктивно-технологічні флуктуації, що мають систематичний характер та усуваються відповідними конструктивними доопрацюваннями, та флуктуації обумовлені фізичною природою процесів та явищ, що виникають при функціонуванні КЛ та носять випадковий характер. До останніх належить нестабільність швидкості обертання Землі ω_3 навколо своєї осі. В літературі [2, 27] вказано, що величина помилки виставки вимірювальної осі КЛ відносно осі обертання Землі залежить від кута α відхилення ортогональності осі КЛ від осі обертання Землі (див. п. 3.2). При цьому відомо, що дрейф нуля КЛ, окрім конструктивних параметрів КЛ залежить і від швидкості обертання Землі навколо своєї осі, яка за результатами досліджень приведених в літературі [28, 29] є нестабільною $\omega_3 \neq const$ (рис. 3.5). Швидкість обертання Землі навколо своєї осі змінюється стрибкоподібно через вплив різних флуктуацій, викликаних планетарними силами – дрейфом магнітних полюсів, теплового градієнту, нестабільністю осі обертання. Величина флуктуацій становить $0,4 \cdot 10^{-3}$ с за період від 2 до 10 днів [28, 29].

коливаннями швидкості обертання Землі [29].

У літературі [29] показано, що екстремуми (мінімуми або максимуми) кутової швидкості обертання Землі збігаються з моментами перебудов елементарних синоптичних процесів (ЕСП) за типізацією Г.Я. Вангенгейма. У 76 % випадків моменти екстремумів кутової швидкості збігаються в межах ± 1 доби з датами перебудов ЕСП. У 24 % випадків моменти екстремумів ω_3 відрізняються на два і більше дня від найближчих дат перебудов ЕСП. В роботі [29] вказується, що зміни погоди синхронізуються з коливаннями швидкості обертання Землі.

Синхронізація змін метеорологічних характеристик зі змінами швидкості обертання Землі ω_3 і динамікою системи Земля–Місяць–Сонце відзначається не тільки на внутрішньомісячних масштабах часу, але і на міжрічних і декадних масштабах. При цьому відомо, що багаторічні зміни аномалій глобальної температури повітря t корелюють з декадними флуктуаціями швидкості обертання Землі ω_3 . На рис. 3.6 показаний цей зв'язок, зокрема видно, що при прискоренні обертання Землі температура повітря t зростає, а при уповільненні – падає [29].

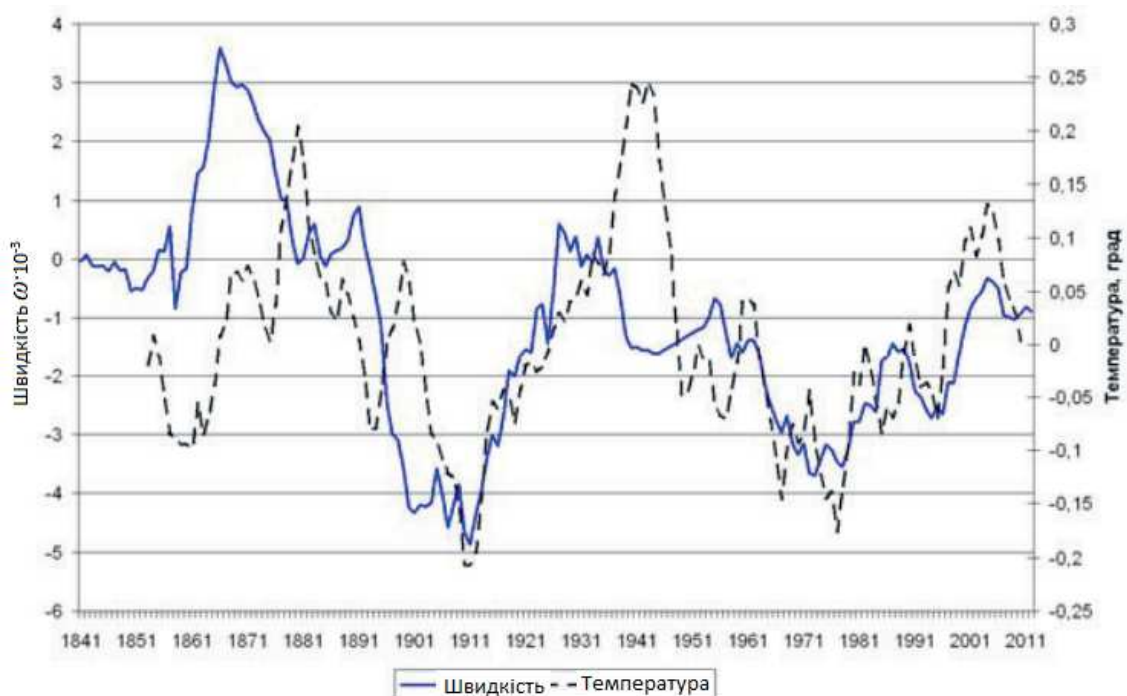


Рис. 3.6. Синхронні зміни швидкості обертання Землі ($\omega \cdot 10^8$) у відносних одиницях (суцільна лінія) і глобальних аномалій температури повітря T (штрихова лінія) за даними HadCRUT3 [29]

Дрейф нуля КЛ визначають за виразом (3.20) [27]:

$$\omega_0 = \frac{N}{T} \cdot \frac{1,296 \cdot 10^6}{2\pi K} - \omega_3 \cdot \cos(n \cdot \omega_3), \quad (3.20)$$

де ω_0 – постійна дрейфу нуля вихідної характеристики;

N – кількість періодів вихідного сигналу КЛ, отримане при додаванні

$$\text{за час } T, N = \frac{1}{2\pi} \int_0^T \Delta \omega dt;$$

ω_3 – швидкість обертання Землі навколо своєї осі;

n – вектор вимірювальної осі КЛ;

K – масштабний коефіцієнт.

Взаємозв'язок між швидкістю обертання Землі ω_3 та параметрами КЛ (дрейфом масштабного коефіцієнту K та нуля ω_0) можна показати взаємозв'язаними виразами наступним чином:

$$\omega_0 = \frac{N}{T} \cdot \frac{1,296 \cdot 10^6}{2\pi K} - \omega_3 \cdot \cos(n \cdot \omega_3) \Rightarrow K = \frac{N}{T(\omega_0 + \omega_3 \cdot \cos(n \cdot \omega_3))} \cdot \frac{1,296 \cdot 10^6}{2\pi K}. \quad (3.21)$$

Із даного виразу (3.25) видно, що за умови $\omega_3 \neq const$ показники K та ω_0 є нестабільними величинами $K \neq const$, $\omega_0 \neq const$:

$$\omega_3 \neq const \Rightarrow \begin{cases} \omega_0 = \text{var}; \\ K = \text{var}. \end{cases} \quad (3.22)$$

Випадковий характер змін швидкості обертання Землі, які частково визначають дрейф нуля ω_0 та масштабного коефіцієнту K КЛ вказує на випадковий характер складової інструментальної похибки $\Delta \varphi_i$ пропонованої ППСВК (див. далі).

3.4. Математична модель похибки прецизійної приладової системи вимірювання кутів

З врахуванням приведеного вище приведенного пропонована математична модель похибки ППСВК представляється виразом (3.23) та системно враховує особливості її складових для подальшого використання при корекції результатів вимірювання:

$$\Delta\varphi = f(\Delta\varphi_I; \Delta\varphi_M; \Delta\varphi_S) =$$

$$= \left(\frac{\int_{t_1}^{t_\varphi} \left[K(t)\omega_\Sigma(t)\cos\alpha(t) + \frac{K_{-1}(t)}{\omega_\Sigma(t)\cos\alpha(t)} + \omega_0(t) \right] dt + N_{q1}}{\int_{t_1}^{t_{2\pi}} \left[K(t)\omega_\Sigma(t)\cos\alpha(t) + \frac{K_{-1}(t)}{\omega_\Sigma(t)\cos\alpha(t)} + \omega_0(t) \right] dt + N_{q2}} + \Delta\varphi_{cal} + \Delta\varphi_{cmos} \right) - \varphi, \quad (3.23)$$

$$\delta_{cmos} = \delta_{cmos}^{dr} + \delta_{cmos}^t,$$

де $\Delta\varphi$ – похибка вимірювання кутів пропонованої ППСВК;

$\Delta\varphi_I$ – інструментальна похибка;

$\Delta\varphi_M$ – методична похибка повірки гоніометра;

$\Delta\varphi_S$ – суб'єктивна похибка оператора;

$t_1, t_\varphi, t_{2\pi}$ – моменти часу початку вимірювання, повороту на вимірюваний кут φ , що розраховується за виразом (3.7) та кут 2π відповідно, що зафіксовані автоколіматором, визначається за виразом (3.9);

$K(t)$ – масштабний коефіцієнт КЛ, що використовується в якості датчика кута, за виразом (3.5);

$\overline{\omega_\Sigma(t)}$ – сумарна кутова швидкість від кутових швидкостей різного роду, що впливає на точність вимірювання ППСВК, що визначається за виразом (3.2) з врахуванням нестабільності обертання Землі (див. п. 3.3);

$\alpha(t)$ – кут між віссю обертання обертового пристрою і віссю чутливості гоніометра, визначається за виразом (3.4);

$K_{-1}(t), \omega_0(t)$ – нелінійність і зсув нуля вихідної характеристики КЛ відповідно;

N_{q1}, N_{q2} – шум і дискретність квантування сигналу;

$\Delta\varphi_{cal}$ – похибка обчислень значень вимірюваного кута в ЕОМ;

$\Delta\varphi_{cmos}$ – похибка фоточутливої КМОП-матриці, обумовлена фотонним та тепловим шумом, описується виразом (3.19);

φ – дійсне значення вимірюваного кута.

3.5. Шляхи зменшення похибок прецизійної приладової системи вимірювання кутів

Зменшення інструментальної похибки

Складовою інструментальної похибки $\Delta\varphi_I$ є похибка фоточутливої КМОП-матриці $\Delta\varphi_{cmos}$, що міститься в результатах вимірювання. Через випадковий характер похибки $\Delta\varphi_{cmos}$ повністю усунути інструментальну похибку $\Delta\varphi_I$ ППСВК неможливо. Проте, враховуючи фізичні принципи роботи фоточутливої матриці, як складової пропонованої ППСВК, а також беручи до уваги результати відомих досліджень похибки автоматизованої прецизійної приладової системи вимірювання кутів, як прототипу пропонованої ППСВК, що приведені в літературі [2] сформульовано шляхи зменшення похибки пропонованої ППСВК.

Пріоритетними шляхами зменшення похибки пропонованої ППСВК є наступні.

1. Використання складових, що мають стабільні параметри.

Стабільність параметрів дозволяє компенсувати шуми при атестації під час заводських випробувань при максимальних технічних можливостях. Тому пропонується використання матриці з розмірністю пікселів $1,0 \times 1,0$ мкм, наприклад, OV16880 або OV20880 виробництва OmniVision (США). Завдяки високій роздільній здатності елементів матриць та ортогональній структурі КМОП матриці в цілому, а також беручи до уваги, що основна похибка автоколіматора залежить від розміру пікселів матриці можна досягти похибки вимірювання $0,1''$.

2. Дотримання температурного режиму експлуатації пропонованої ППСВК.

Відомо, що значення абсолютної температури T , яка є опорною величиною джерел шуму при вимірюванні коефіцієнту шуму, що описується виразом (3.13) становить 290 К або приблизно 17°C . Тому при експлуатації пропонованої ППСВК температура навколишнього середовища повинна складати близько 17°C .

3. Проведення багаторазових вимірювань.

Беручи до уваги випадковий характер теплового та фотонного шумів КМОП-матриці, а також нестабільності швидкості обертання Землі навколо своєї осі, величину випадкової складової похибки необхідно зменшувати шляхом

проведення багаторазових вимірювань (спостережень).

4. Фільтрація вихідного сигналу.

Проведення фільтрації вихідного сигналу для підвищення якості вихідного сигналу може виконуватись апаратними засобами та програмними методами на ЕОМ. Для запобігання ускладненню конструкції запропонованої ППСВК фільтрація виконується програмно на ПК за методом ковзних середніх, що є окремим випадком фільтра Калмана.

Зменшення методичної похибки

Методична похибка $\Delta\varphi_M$ обумовлюється похибкою використовуваного методу атестації, повірки та градування, дрейфом вихідної характеристики, похибкою обчислень значень вимірюваного кута на ПК, нормативних документів, а також недосконалістю методів врахування та нормування систематичних і випадкових складових похибок [2, 3, 13, 23, 25, 26]. В роботі [2] розроблено заходи щодо часткового зменшення методичної похибки. Проте не висвітлені проблеми оцінки точності вимірювань, врахування та нормування систематичних і випадкових складових похибок за метрологічними стандартами. Це питання розглядається в інших наукових дослідженнях [13, 25, 26]. Зокрема в роботі [13] виконано аналіз методів оцінки точності вимірювань за метрологічними стандартами ДСТУ 8.009:2008 “Державна система забезпечення єдності вимірювань. Нормовані метрологічні характеристики засобів вимірювань” та ДСТУ-Н РМГ 63:2013 “Державна система забезпечення вимірювань”. Показано, що згідно із стандартом [21] похибки підсумовують одним із трьох способів – алгебраїчним, геометричним, з врахуванням кореляції. При наявності випадкової складової похибки вимірювання використовують геометричне підсумовування. Вибір способу підсумовування систематичних похибок є неоднозначним та нечітким. Це обумовлюється відсутністю повної інформації про закон її розподілення.

Відсутність чітких рекомендацій щодо вибору способу підсумовування похибок призводить, до неоднозначності прийняття рішень. Рішення приймаються суб’єктивно виходячи із міркувань ймовірності виникнення небезпеки життю людей, значних економічних збитків, техногенних катастроф тощо. Як правило, в такому випадку, використовують алгебраїчний спосіб, хоча

це досить часто призводить до завищеної оцінки величини похибки. В роботі [26] вказується, що в метрологічних стандартах [21, 22, 23, 24] спостерігається суперечність термінології, відсутність підпорядкування нормативних документів, повна відсутність гармонізації з міжнародними стандартами

Беручи до уваги викладене можна констатувати, що зменшенню методичної похибки сприятиме вдосконалення державних метрологічних стандартів України, що регламентують оцінку та нормування похибок вимірювання. При цьому, зважаючи на інтеграцію України у світовий промисловий ринок, варто прагнути до врахування зарубіжного досвіду, щодо забезпечення якості нормативної метрологічної бази.

Зменшення суб'єктивної похибки

Суб'єктивна складова похибки $\Delta\varphi_s$ залежить від ретельності роботи та кваліфікації особи, що проводить вимірювання. У автоматизованому прецизійному пристрої для вимірювання куті, що є прототипом запропонованої ППСВК повністю автоматизовано процес безпосереднього вимірювання кутів, в результаті виключено суб'єктивні похибки оператора [2], що пов'язані із проведенням процедури вимірювання. Проте не враховано похибки оператора, що виникають при обробці результатів вимірювання. Аналіз інформаційних джерел [1, 2, 3, 4, 5, 6, 13, 14, 15,] та вимірювальна практика показують, що оператори при обробці результатів вимірювання можуть вносити суттєві похибки, наслідком чого є помилкові результати вимірювання. Особливі проблеми виникають при диференціюванні випадкових та систематичних складових похибок вимірювання. Диференціювання складових похибок вимірювання необхідно проводити для адекватного застосування методів та алгоритмів обробки експериментальних даних з врахуванням їх складності та необхідної точності, оскільки в основу оцінок величин систематичних та випадкових похибок покладено низку принципів, що мають принципово різний характер та трудомісткість.

Беручи до уваги викладене визначено, що шляхом повного виключення суб'єктивної похибки є:

1. Автоматизація розпізнавання випадкових та систематичних складових похибок вимірювання.
2. Підвищення вимог до кваліфікації персоналу.

3. Жорстке дотримання та ретельність виконання методик вимірювання, обчислення і нормування складових похибок вимірювання.

3.6. Розробка підходу щодо визначення кількості багаторазових вимірювань при нормуванні випадкової складової похибки вимірювання кутів ППСВК

Зменшення випадкових похибок проводиться шляхом багаторазових вимірювань (спостережень). Процедура обробки багаторазових вимірювань відома, має багаторічну практику застосування, добре обґрунтована та максимально формалізована. Проте при проведенні багаторазових вимірювань основною проблемою залишається визначення необхідної кількості вимірювань. Аналіз інформаційних джерел щодо обробки результатів спостережень при багаторазових вимірюваннях дозволив констатувати наступне. При нормуванні випадкової складової похибки вимірювання за результатами багаторазових спостережень виникає дві хибності: перша полягає в тому, що проведення недостатньої кількості вимірювань призводить до недостатньо високої точності, а друга полягає в тому, що надлишкова кількість вимірювань призводить до збільшення тривалості процесу вимірювання.

З огляду на вказане актуальним є формування методики визначення оптимальної кількості вимірювань при нормуванні випадкової складової похибки вимірювання, що дозволить: визначити необхідну кількість багаторазових вимірювань, яка буде достатньою для досягнення заданої точності та знайти деякий компроміс між підвищенням точності вимірювання та тривалістю її проведення.

У відомих метрологічних роботах [2, 13, 14, 15, 16, 17, 18] питання визначення кількості вимірювань при оцінці випадкової складової похибки зводиться до одного висновку: чим більшою є кількість вимірювань, тим вищою буде точність. Так в роботах [13, 14] на основі аналізу методів обліку випадкових та систематичних похибок при оцінці точності та метрологічній надійності засобів вимірювання за результатами багаторазових спостережень стверджується, що вищою точність та метрологічна надійність буде у випадку проведення багаторазових вимірювань. Проте не вказується яка саме кількість вимірювань

має бути проведена і як вона може бути визначена. В роботах [2, 15] проводиться оцінка випадкової складової похибки вимірювання гоніометричних систем за результатами багаторазових вимірювань. Питання визначення необхідної кількості вимірювань, яка буде достатньою для досягнення заданої точності нерозкрито. В роботах [16, 17, 18] авторами при дослідженні гоніометричних систем в медичній практиці проводились багаторазові вимірювання з різними кількостями спостережень. В результаті досліджень стверджується, що ступінь випадкової похибки буде зменшуватись при збільшенні кількості клінічних досліджень та рівня кваліфікації експериментатора. Питання ж обґрунтування кількості вимірювань залишається не розкритим.

Відповіді на питання щодо визначення об'ємів вибірки при обробці результатів багаторазових спостережень можна знайти в задачах математичної статистики та економіко-математичного планування. Наприклад, в роботі [19] методами математичної статистики при клінічних медичних лабораторних дослідженнях визначається необхідна кількість пацієнтів для діагностичного дослідження, підтвердження лікувальних ефектів лікарських засобів, епідеміологічних дослідженнях тощо. Також, наприклад, в роботі [20] ці ж методи покладені в основу визначення необхідної кількості експертів для проведення експертного аналізу щодо оцінки інвестиційних проектів. Очевидно, що приведена практика після відповідної адаптації та доопрацювання може бути використана як підґрунтя при вирішенні метрологічних задач пов'язаних з оцінкою та нормуванням випадкових складових похибок вимірювання, в тому числі пропонованої ППСВК.

Як вказувалось вище, випадкові похибки можна суттєво зменшити шляхом збільшення кількості спостережень. Тому оцінка та зменшення випадкової складової похибки вимірювання кутів пропонованою ППСВК може здійснюватись лише за рахунок збільшення кількості повторів вимірювань з перевіркою на точність отриманих експериментальних даних. При цьому необхідність обґрунтованого визначення необхідної кількості спостережень при багаторазових вимірюваннях є очевидною.

3.6.1. Опис методики визначення оптимальної кількості вимірювань при нормуванні випадкової складової похибки вимірювання прецизійною приладовою системою вимірювання кутів

Пропонована загальна методика призначена на визначення оптимальної (необхідної та достатньої) кількості вимірювань для досягнення заданої високої точності та довірчої ймовірності (надійності) результатів вимірювання, з огляду на часові аспекти витрат. В цьому випадку постає багатокритеріальна задача, що характеризується відповідною цільовою функцією F , яка виражає співвідношення між бажаними результатами (визначенні такої кількості вимірювань K при якій можна досягти найменшої похибки $\Delta \rightarrow \min$ отриманих результатів при наперед заданих точності статистичної вибірки $\varepsilon \rightarrow \max$ та довірчій ймовірності $\alpha \rightarrow \max$, а витрати T часу на виконання процедури вимірювання T можна вважати найменшими $T = f(K) \rightarrow \min$ в контексті розв'язуваної задачі. Формальна постановка задачі може бути представлена наступним чином:

$$F(K): \begin{cases} K = \left[(t^2 \sqrt{\sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)^2 / (n-1) / \varepsilon^2} \right] \rightarrow opt; \\ \Delta \rightarrow \min; \\ \varepsilon \rightarrow \max; \\ \alpha = (2\Phi(t)) \rightarrow \max; \\ T = f(K) \rightarrow \min, \end{cases}, \quad (3.24)$$

де K – оптимальна, в прийнятому розумінні, кількість вимірювань;

n – об'єм вибірки;

\bar{X} – середнє арифметичне результатів вимірювання;

X_i – результати багаторазових вимірювань;

ε – точність результатів вимірювання;

α – ймовірча надійність (достовірність);

T – тривалість процедури вимірювання.

Методика може бути реалізована за наступною послідовністю етапів. На кожному етапі пропонованої методики передбачається розв'язання низки задач. При цьому результати, отримані на кожному з попередніх етапів, є вихідними

даними для наступного етапу.

I. Здійснюється формулювання мети експерименту.

II. Аналізується досліджувана ІВС та формується попередньо модель похибки.

III. Визначається оптимальна кількість повторів дослідів із застосуванням підходів математичної статистики та теорії ймовірності.

IV. Проводиться експеримент, обробляються, оцінюються та інтерпретуються результати дослідження.

I етап – формулювання мети експерименту – здійснюється постановка задачі та формулюється мета проведення експерименту. Задача полягає в тому, що необхідно визначити оптимальну (тобто необхідну та достатню) кількість повторів вимірювань для досягнення максимальної точності при заданій довірчій ймовірності (надійності) і, як результат, зменшити тривалість процедури вимірювання.

II етап – аналіз досліджуваної ППСВК та формування попередньої моделі похибки вимірювання. Змістом цього етапу є проведення аналізу досліджуваної ППСВК з попереднім формуванням моделі похибки вимірювання.

III етап – визначення оптимальної кількості багаторазових вимірювань. На цьому етапі здійснюється розрахунок необхідної і достатньої кількості повторів спостережень / вимірювань / дослідів, тобто об'єму вибірки розміром K . Застосовуються методи математичної статистики та теорії ймовірності для забезпечення високої точності та достовірності отриманих результатів при мінімальних витратах ресурсів, перш за все часових.

IV етап – проведення багаторазових вимірювань та обробка експериментальних даних. На цьому етапі відбувається проведення вимірювання, визначення середнього квадратичного відхилення, наявності грубих похибок, результату вимірювання тощо, а також інтерпретація отриманих результатів та корекція моделі похибки (за необхідністю).

Узагальнена послідовність вирішення задач пропонованої методики представлена на рис. 3.7.

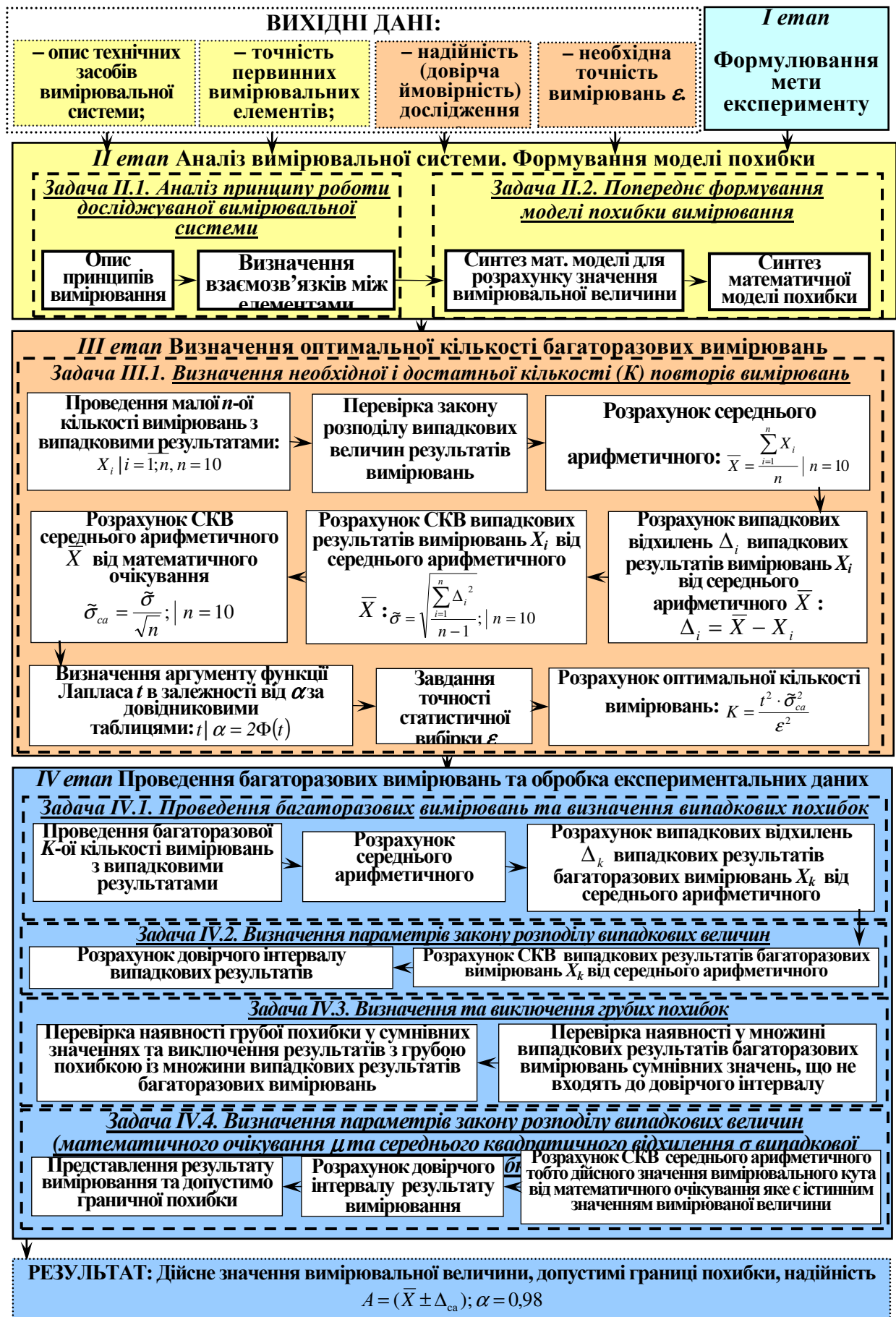


Рис. 3.7. Схема розробленої методики розрахунку необхідної кількості спостережень при багаторазових вимірюваннях, що є достатньою для забезпечення заданої точності

На кожному етапі пропонованої методики передбачається розв'язання низки задач. При цьому результати, отримані на кожному з попередніх етапів, є вихідними даними для наступного етапу. Так, на *I етапі* пропонованої методики здійснюється постановка задачі та формулюється мета проведення експерименту, яка полягає у визначенні кількості вимірювань. Задача полягає в тому, що необхідно визначити оптимальну (тобто необхідну та достатню) кількість повторів вимірювань для досягнення максимальної точності при заданій надійності і як наслідок мінімізації економічних витрат пов'язаних із зменшенням тривалості процедури вимірювання.

На *II етапі* здійснюється аналіз принципу роботи досліджуваної ІВС та попереднє формування моделі похибки вимірювання.

Задача II.1. Аналіз принципу роботи досліджуваної вимірювальної системи.

Принцип вимірювання пропонованою ППСВК спрощено можна представити наступним чином. Об'єкт вимірювання наприклад, призма, кути якої підлягають вимірюванню, встановлюється на предметний стіл 2, що обертається за допомогою обертового пристрою 3 з постійною швидкістю. При обертанні предметного столу 2 з призмою від кожної її грані на виході автоколіматора 5 формуються електричні імпульси які підраховуються лічильниками у ППС та передаються на ЕОМ ПВС пропонованої ППСВК (див. розділ 2, рис. 2.5).

Задача II.2. Попереднє формування моделі похибки вимірювання.

Пропонована модель похибки вимірювання пропонованої ППСВК представлена виразом (3.23). Очевидно, що оцінка похибки $\Delta\varphi$ за виразом (3.23) у загальному вигляді є досить складною математичною задачею. Тому при вирішенні практичних задач можна використовувати вираз (3.11).

На *III етапі* здійснюється визначення необхідної і достатньої кількості повторів дослідів / вимірювань або так званого об'єму вибірки із застосуванням методів математичної статистики та теорії ймовірності.

Задача III.1. Визначення необхідної і достатньої кількості (K) повторів дослідів / вимірювань.

Часто на практиці при дослідженні похибок приймають інтервал можливих значень з припущенням, що будь-яке значення в межах цього інтервалу рівно ймовірне, тобто випадкова величина розподіляється рівномірно в межах

прийнятого інтервалу. Дане твердження не задовольняє сучасним вимогам щодо дослідження точності вимірювання ППСВК, оскільки воно прийняте для спрощення та полегшення теоретичних досліджень. Очевидно, що точність оцінки величин похибок ППСВК в першу чергу залежить від кількості випробовувань – об'єму вибірки (K), [9, 10].

Проте, занадто великий об'єм статистичної вибірки K призводить до необґрунтованого підвищення вартості процедури вимірювання та збільшення часу на її проведення, що є неприйнятним з економічних міркувань. Від правильного вибору об'єму вибірки K залежать об'єми досліджень та терміни, за які дослідження має бути проведено, а також точність та надійність (довірча ймовірність) результатів дослідження. В свою чергу, об'єм вибірки K залежить від співвідношення об'ємів генеральної сукупності досліджуваної величини та вибірки, від точності ε та довірчої ймовірності (надійності) α , з якими необхідно провести ймовірнісний аналіз величини випадкової складової похибки вимірювання ППСВК. Довірча ймовірність (надійність) α в машино- та приладобудуванні, як правило приймають в інтервалі від 0,95 до 0,99 [9, 10].

Об'єм вибірки K при різних співвідношеннях об'ємів генеральної сукупності та самої вибірки, в тому числі при нормуванні похибок вимірювання пропонованої ППСВК, може бути визначений за розрахунковими формулами приведеними в літературі [9, 10]. Зокрема об'єм вибірки може бути визначений за наступною формулою [9, 10]:

$$K = \frac{t^2 \cdot \sigma^2}{\varepsilon^2}, \quad (3.25)$$

де t – аргумент функції Лапласа, що визначається за довідниковими таблицями [9] в залежності від надійності $\alpha = 2\Phi(t)$;

σ – середнє квадратичне відхилення малої вибірки об'ємом не більше 10 значень;

ε – точність статистичної вибірки.

Відповідно до попереднього викладення, необхідна і достатня кількість вимірювань для визначення випадкової складової похибки вимірювання пропонованою ППСВК визначається за наступною послідовністю кроків.

Крок 1. Проводиться порівняно мала кількість (n) вимірювань. Об'єм малої вибірки повинен становити не більше 10 значень.

На рис. 3.8 приведено приклад графічного представлення розподілення випадкових величин порівняно малої вибірки з $n = 10$ при вимірюванні плоского кута 24-граної призми.

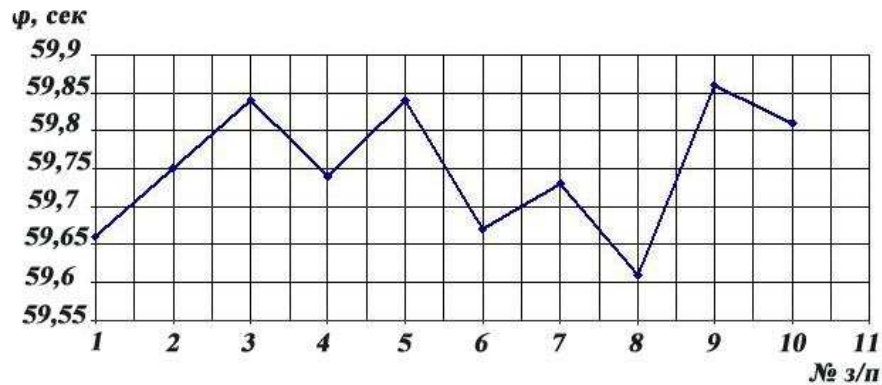


Рис. 3.8. Графічне представлення розподілення випадкових величин порівняно малої вибірки об'ємом $n = 10$ при вимірюванні плоского кута 24-граної призми

Крок 2. Проводиться перевірка закону розподілення випадкових величин порівняно малої вибірки та параметрів закону розподілу – математичного очікування μ та середнього квадратичного відхилення σ випадкової величини (похибки).

Оскільки складові похибок вимірювання пропонованої ППСВК є випадковими величинами, то неможливо заздалегідь передбачити закон розподілення. Проте багатьма науковцями та дослідниками прийнято вважати, що похибки підпорядковуються нормальному закону розподілу [9, 10], для якого функція густини розподілу імовірності має вигляд:

$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.26)$$

де μ – математичне очікування випадкової величини (похибки);

σ – середнє квадратичне відхилення випадкової величини (похибки).

Крок 3. За довідниковими таблицями [9] в залежності від надійності $\alpha = 2\Phi(t)$ визначається аргумент функції Лапласа t . Причому надійність α відповідно до

рекомендацій наданих в літературі [9] може бути прийнята рівною 0,98.

Крок 4. Задається точність статистичної вибірки ε .

Крок 5. Розраховується необхідна і достатня кількість вимірювань.

На *IV етапі* проводяться багаторазові вимірювань та обробка експериментальних даних.

Задача IV.1. Проведення багаторазових вимірювань та визначення випадкових похибок

Проводяться багаторазові (в даному випадку з $K = 37$) вимірювання, кількість K яких була визначена на *III етапі* пропонованої методики, що дає можливість сформувати статистичну вибірку щодо похибки вимірювання ППСВК. Очевидно, що при кожному повторному вимірюванні отримані результати будуть відрізнятися від істинного значення на величину похибки. Для зручності сприйняття отриманих результатів та подальшого їх використання і аналізу при оцінці випадкової складової похибки вимірювання - приводиться графічне представлення розподілення випадкових величин отриманої вибірки об'ємом $K = 37$ (рис. 3.9).

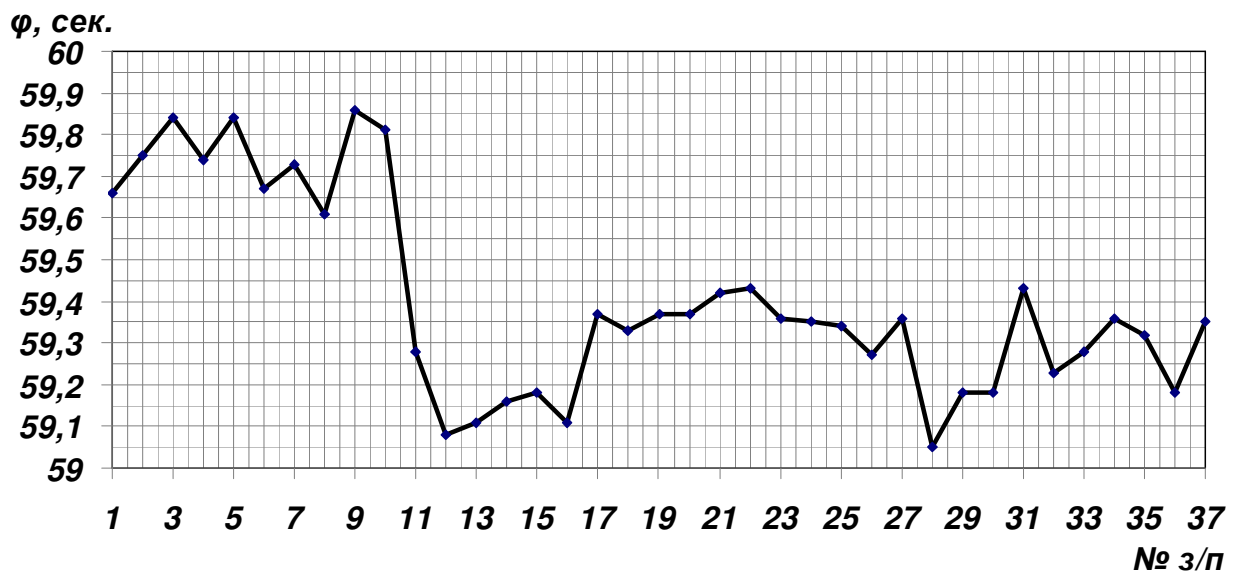


Рис. 3.9. Графічне представлення розподілення випадкових величин при багаторазових ($K = 37$) вимірюваннях плоского кута 24-граної призми

Загальна похибка обчислюється як різниця між виміряним та істинним значенням. З врахуванням того, що істинне значення практично не можливо

визначити, то замість нього використовується дійсне значення, яке обчислюється як середнє арифметичне результатів багаторазових вимірювань. Для прикладу, візьмемо значення при вимірюванні плоского кута 24-граної призми:

$$\varphi_{ca} = \bar{X} = \frac{\sum_{k=1}^K X_k}{K}, \quad (3.27)$$

де φ_{ca} – дійсне значення кута,

\bar{X} – середнє арифметичне результатів багаторазових вимірювань;

X_k – k -й результат багаторазових вимірювань

K – об'єм вибірки (кількість вимірювань), $K = 37$.

Подальший імовірнісний аналіз отриманої вибірки здійснюється при розв'язуванні наступної задачі.

Задача IV.2. Визначення параметрів закону розподілу випадкових величин (математичного очікування μ та середнього квадратичного відхилення σ випадкової величини (похибки))

Для визначення похибки вимірювання ППСВК за отриманою вибіркою проводяться статистичні дослідження, визначаються параметри закону розподілу імовірності (математичне сподівання та середнє квадратичне відхилення).

Задача розв'язується за наступною послідовністю кроків.

Крок 1. Статистичні дослідження полягають у статистичному аналізі вибірки, який проводиться шляхом визначення максимального та мінімального значень вимірюваного кута з врахуванням похибок.

Крок 2. Визначення параметрів законів розподілу:

– математичне очікування μ являє собою істинне значення вимірюваного кута та може бути визначене при кількості вимірювань $K \rightarrow \infty$, тому приймають, що $\bar{X} \approx \mu$.

– середнє квадратичне відхилення σ випадкової величини від дійсного значення вимірюваного кута:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K \Delta_k^2}{K-1}}, \quad (3.28)$$

де Δ_k – випадкове відхилення k -го результату X_k багаторазових вимірювань від середнього арифметичного \bar{X} , $\Delta_k = \bar{X} - X_k$;

K – кількість вимірювань (об'єм вибірки), $K = 37$.

– середнє квадратичне відхилення σ_{ca} дійсного значення вимірюваного кута від істинного значення, тобто середнього арифметичного від математичного очікування:

$$\tilde{\sigma}_{ca} = \frac{\tilde{\sigma}}{\sqrt{K}}, \quad (3.29)$$

де K – кількість вимірювань (об'єм вибірки), $K = 37$.

Задача IV.2. Визначення та виключення грубих похибок. Грубі похибки або промахи суттєво перевищують очікувану в даних умовах похибку та спотворюють результат вимірювання, тому підлягають виключенню із вибірки. Грубі похибки можуть виникати внаслідок помилок експериментатора, різких та неочікуваних змін умов вимірювання тощо.

Для визначення та наступного виключення грубих похибок застосовуються математичні методи за наступною послідовністю кроків.

Крок 1. Обчислюється довірчий інтервал Δ_{X_k} результатів багаторазових вимірювань X_k :

$$\Delta_{X_k} = \bar{X} \pm K_L \cdot \tilde{\sigma}, \quad (3.30)$$

де \bar{X} – середнє арифметичне результатів багаторазових вимірювань;

K_L – значення функції Лапласа $P\{|t| < K_L\} = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^{K_L} e^{-\frac{y^2}{2}} dy$, що

визначається за довідниковими таблицями в залежності від довірчої ймовірності (надійності) α , яка відповідно до рекомендацій наданих в літературі [9, 10] прийнята рівною 0,98.

Крок 2. Перевірка наявності у множині результатів багаторазових вимірювань X_k сумнівних значень X'_k , що не входять до довірчого інтервалу Δ_{X_k} .

Крок 3. Перевірка наявності грубої похибки у сумнівних значеннях X'_k . При відсутності у сумнівному значенні X'_k грубої похибки виконується умова:

$$|\bar{X} - X'_k| < \Delta_\Gamma, \quad (3.31)$$

$$\Delta_{\Gamma} = K_{\Gamma} \cdot \tilde{\sigma},$$

де K_{Γ} – коефіцієнт для визначення границь грубих похибок Δ_{Γ} . K_{Γ} визначається за таблицями в залежності від надійності α та об'єму вибірки K .

σ – середнє квадратичне відхилення випадкової величини від дійсного значення вимірюваного кута.

Значення X'_k для яких не виконується умова (3.31) містять грубу похибку та виключаються із вибірки. Після цього уточнюється дійсне значення вимірюваного кута, σ та σ_{ca} .

Задача IV.2. Представлення результату вимірювання та нормування допустимої граничної похибки

Дана задача вирішується за наступну послідовність кроків.

Крок 1. Розрахунок довірчого інтервалу Δ_{ca} дійсного значення вимірюваного кута:

$$\Delta_{ca} = \pm K_{ca} \cdot \tilde{\sigma}_{ca}, \quad (3.32)$$

де K_{ca} – коефіцієнт Ст'юдента $P\{|t| < t_s\} = 2 \int_0^{t_s} f(t, n) dt$, що визначається за

довідниковими таблицями в залежності від довірчої ймовірності (надійності) α та об'єму вибірки K .

σ_{ca} – середнє квадратичне відхилення дійсного значення вимірюваного кута від його істинного значення.

Крок 2. Результат вимірювання з нормованим значенням допустимої граничної випадкової похибки представляється у вигляді наступного виразу:

$$\varphi = A = (\bar{X} \pm \Delta_{ca}); \alpha = 0,95, \quad (3.33)$$

де \bar{X} – середнє арифметичне результатів багаторазових вимірювань або дійсне значення вимірюваного кута;

Δ_{ca} – довірчий інтервал;

α – довірча ймовірність (надійність) з якою проводився імовірнісний аналіз величини випадкової складової похибки вимірювання. За рекомендаціями літературних джерел [9, 10] для машино- та

приладобудування довірна ймовірність (надійність) приймається рівною 0,98.

3.6.2. Результуючі етапи методики визначення оптимальної кількості вимірювань

Результати отримані для базового прикладу при вимірюванні одного із кутів 24-гранної призми на третьому етапі запропонованої методики, приведені в табл. 3.1. Для даного прикладу, необхідна і достатня кількість вимірювань становить $K = 37$. Така кількість вимірювань дозволяє оцінити випадкову складову похибки вимірювання базового прикладу – плоского кута 24-гранної призми з точністю до 0,079'' при довірчій ймовірності (надійності) 0,98 (див. табл. 3.2).

Таблиця 3.1

Результати визначення необхідної і достатньої кількості вимірювань для оцінки випадкової складової похибки вимірювання плоского кута 24-гранної призми

№ з/п	Виміряні значення кута, φ_i			$\Delta_i = \varphi_{ca} - \varphi_i$	Δ_i^2
	Град.	Хв.	Сек.	Сек.	Сек.
1	164	59	59,66	0,091	0,0081
2	164	59	59,75	0,001	0
3	164	59	59,84	-0,089	0,0081
4	164	59	59,74	0,011	0,0001
5	164	59	59,84	-0,089	0,0081
6	164	59	59,67	0,081	0,0064
7	164	59	59,73	0,021	0,0004
8	164	59	59,61	0,141	0,0196
9	164	59	59,86	-0,109	0,0121
10	164	59	59,81	-0,059	0,0036
Середнє арифметичне (дійсне значення кута) φ_{ca}			59,751	$\Sigma = 0$	$\Sigma = 0,086$
СКВ виміряних значень плоского кута від середнього арифметичного (дійсного значення кута) $\tilde{\sigma}$			$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n-1}} \Big _{n=(\overline{1;10})}$		0,098
СКВ дійсного значення кута від істинного (математичного очікування)			$\tilde{\sigma}_{ca} = \frac{\tilde{\sigma}}{\sqrt{n}} \Big _{n=(\overline{1;10})}$		0,031
Надійність (довірча ймовірність) α [9, 10]	0,98		Аргумент функції Лапласа t [9, с. 13, табл. 3]		1,97
Точність статистичної вибірки ε	0,01		Необхідна кількість експериментів		37

В табл. 3.2 приведені результати багаторазового вимірювання ППСВК одного із кутів 24-гранної призми з необхідною і достатньою кількістю вимірювань $K = 37$ визначеною за пропонованою методикою.

Таблиця 3.2

Результати багаторазового вимірювання значень плоского кута
24-гранної призми ППСВК при заданій кількості експериментів $K = 37$

№ з/п	Виміряні значення кута, φ_k			$\Delta_k = \varphi_{ca} - \varphi_k$	Δ_k^2
	Град.	Хв.	Сек.	Сек.	Сек.
1	164	59	59,66	-0,2557	0,06538
2	164	59	59,75	-0,3457	0,11951
3	164	59	59,84	-0,4357	0,18983
4	164	59	59,74	-0,3357	0,11269
5	164	59	59,84	-0,4357	0,18983
6	164	59	59,67	-0,2657	0,0706
7	164	59	59,73	-0,3257	0,10608
8	164	59	59,61	-0,2057	0,04231
9	164	59	59,86	-0,4557	0,20766
10	164	59	59,81	-0,4057	0,16459
11	164	59	59,28	0,1243	0,01545
12	164	59	59,08	0,3243	0,10517
13	164	59	59,11	0,2943	0,08661
14	164	59	59,16	0,2443	0,05968
15	164	59	59,18	0,2243	0,05031
16	164	59	59,11	0,2943	0,08661
17	164	59	59,37	0,0343	0,00118
18	164	59	59,33	0,0743	0,00552
19	164	59	59,37	0,0343	0,00118
20	164	59	59,37	0,0343	0,00118
21	164	59	59,42	-0,0157	0,00025
22	164	59	59,43	-0,0257	0,00066
23	164	59	59,36	0,0443	0,00196
24	164	59	59,35	0,0543	0,00295
25	164	59	59,34	0,0643	0,00413
26	164	59	59,27	0,1343	0,01804
27	164	59	59,36	0,0443	0,00196
28	164	59	59,05	0,3543	0,12553
29	164	59	59,18	0,2243	0,05031
30	164	59	59,18	0,2243	0,05031
31	164	59	59,43	-0,0257	0,00066
32	164	59	59,23	0,1743	0,03038
33	164	59	59,28	0,1243	0,01545
34	164	59	59,36	0,0443	0,00196
35	164	59	59,32	0,0843	0,00711

№ з/п	Виміряні значення кута, φ_k			$\Delta_k = \varphi_{ca} - \varphi_k$	Δ_k^2
	Град.	Хв.	Сек.	Сек.	Сек.
36	164	59	59,18	0,2243	0,05031
37	164	59	59,35	0,0543	0,00295
Середнє арифметичне (дійсне значення кута) φ_{ca}			59,45	$\Sigma = 0$	$\Sigma = 2,046$
СКВ виміряних значень кута від середнього арифметичного (дійсного значення кута) $\tilde{\sigma}$			$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^K \Delta_i^2}{K-1}} \mid K = (\overline{1; 37})$		0,238
Довірчий інтервал Δ_{φ_k} випадкових результатів багаторазових вимірювань значення кута φ_k			$\Delta_{\varphi_k} = \varphi_{ca} \pm K_L \cdot \tilde{\sigma}$, де K_L – значення функції Лапласа, $K_L = 2,0$		$\pm K_L \cdot \tilde{\sigma} = (\pm 0,476)$
					$\Delta_{\varphi_6} = 59,8803$
					$\Delta_{\varphi_n} = 58,9283$
СКВ дійсного значення кута від істинного (математичного очікування)			$\tilde{\sigma}_{ca} = \frac{\tilde{\sigma}}{\sqrt{K}} \mid K = (\overline{1; 37})$		0,039
Довірчий інтервал Δ_{ca} результату вимірювання			$\Delta_{ca} = \pm K_{ca} \cdot \tilde{\sigma}_{ca}$ де K_{ca} – коефіцієнт Ст`юдента, $K_{ca} = 2,02$		$\pm K_{ca} \cdot \tilde{\sigma}_{ca} = (\pm 0,07878)$
Надійність (довірча ймовірність) $\alpha [9, 10]$		0,98	Результат вимірювання	164° 59' 59,450"± 0,079"	
Точність статистичної вибірки ε		0,01			

Аналогічним чином можуть бути проведені обчислення для інших видів багатограних призм. Так, наприклад, для 36-гранної призми, за пропонуваною методикою визначення оптимальної кількості вимірювань при нормуванні випадкової складової похибки вимірювання з точністю до 0,01" та надійністю 0,95, необхідна і достатня кількість вимірювань становить 37 (табл. 3.3). На рис. 3.10 приведено графічне представлення розподілення випадкових величин порівняно малої вибірки з $n = 10$ при вимірюванні плоского кута 36-гранної призми.

Таблиця 3.3

Результати визначення необхідної і достатньої кількості вимірювань для оцінки випадкової складової похибки вимірювання плоского кута 36-гранної призми

№ з/п	Виміряні значення кута, φ_i			$\Delta_i = \varphi_{ca} - \varphi_i$	Δ_i^2
	Град.	Хв.	Сек.	Сек.	Сек.
1	170	69	69,8	0,137	0,018769
2	170	69	69,7993	0,13772412	0,0189679
3	170	69	69,9552	-0,0181585	0,0003297
4	170	69	69,9141	0,02294952	0,00053
5	170	69	70,152	-0,2149711	0,0462126
6	170	69	69,8466	0,09044585	0,0081805
7	170	69	69,7909	0,14605009	0,0213306
8	170	69	70,036	-0,099018	0,0098046
9	170	69	69,7616	0,17535764	0,0307503
10	170	69	70,3152	-0,3782281	0,1430565
Середнє арифметичне (дійсне значення кута) φ_{ca}			69,937	$\Sigma = -0,001$	$\Sigma = 0,182$
СКВ виміряних значень плоского кута від середнього арифметичного (дійсного значення кута) $\tilde{\sigma}$			$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n-1}} \Big n = (\overline{1; 10})$		0,142
СКВ дійсного значення кута від істинного (математичного очікування)			$\tilde{\sigma}_{ca} = \frac{\tilde{\sigma}}{\sqrt{n}} \Big n = (\overline{1; 10})$		0,045
Надійність (довірча ймовірність) α [9, 10]	0,98		Аргумент функції Лапласа t [9, с. 13, табл. 3]		1,97
Точність статистичної вибірки ε	0,01		Необхідна кількість експериментів		37

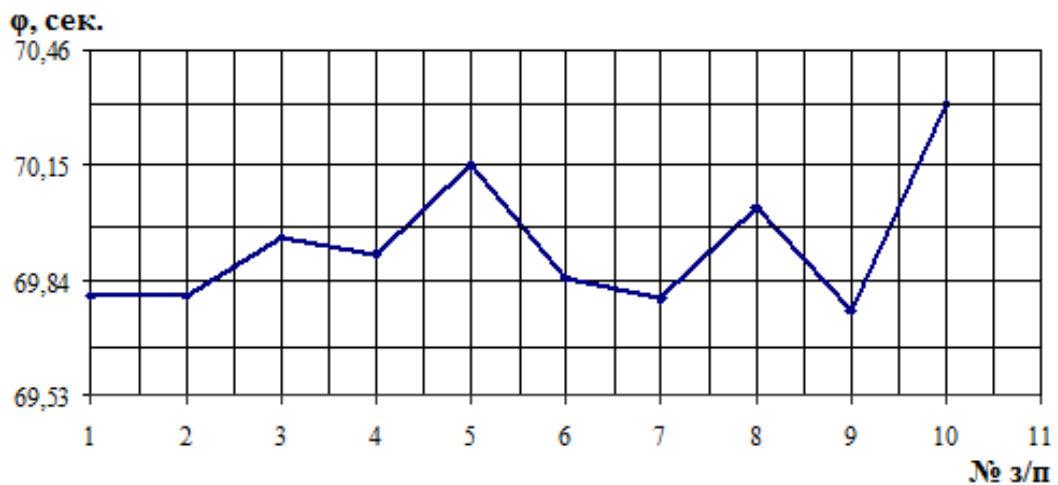


Рис. 3.10. Графічне представлення розподілення випадкових величин порівняно малої вибірки об'ємом $n = 10$ при вимірюванні плоского кута 36-гранної призми

Наприклад, для 18-гранної призми, за пропонованою методикою визначення оптимальної кількості вимірювань при нормуванні випадкової складової похибки вимірювання з точністю до 0,01" та надійністю 0,95, необхідна і достатня кількість вимірювань становить 37 (табл. 3.4).

Таблиця 3.4

Результати визначення необхідної і достатньої кількості вимірювань для оцінки випадкової складової похибки вимірювання плоского кута 18-гранної призми

№ з/п	Виміряні значення кута, φ_i			$\Delta_i = \varphi_{ca} - \varphi_i$	Δ_i^2
	Град.	Хв.	Сек.	Сек.	Сек.
1	160	10	9,98	0,014	0,000196
2	160	10	10	-0,006	3,6E-05
3	160	10	10	-0,006	3,6E-05
4	160	10	9,99	0,004	0,00002
5	160	10	10	-0,006	3,6E-05
6	160	10	10	-0,006	3,6E-05
7	160	10	9,99	0,004	1,6E-05
8	160	10	9,99	0,004	1,6E-05
9	160	10	10	-0,006	3,6E-05
10	160	10	9,99	0,004	1,6E-05
Середнє арифметичне (дійсне значення кута) φ_{ca}			9,994	$\Sigma = 0$	$\Sigma = 0,007$
СКВ виміряних значень плоского кута від середнього арифметичного (дійсного значення кута) $\tilde{\sigma}$			$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n-1}} \Big _{n=(\overline{1; 10})}$		0,028
СКВ дійсного значення кута від істинного (математичного очікування)			$\tilde{\sigma}_{ca} = \frac{\tilde{\sigma}}{\sqrt{n}} \Big _{n=(\overline{1; 10})}$		0,09
Надійність (довірча ймовірність) $\alpha [9, 10]$	0,98		Аргумент функції Лапласа $t [9, \text{с. 13, табл. 3}]$		1,97
Точність статистичної вибірки ε	0,01		Необхідна кількість експериментів		37

Графічне представлення розподілення випадкових величин порівняно малої вибірки з $n = 10$ при вимірюванні плоского кута 18-гранної призми приведено на рис. 3.11.

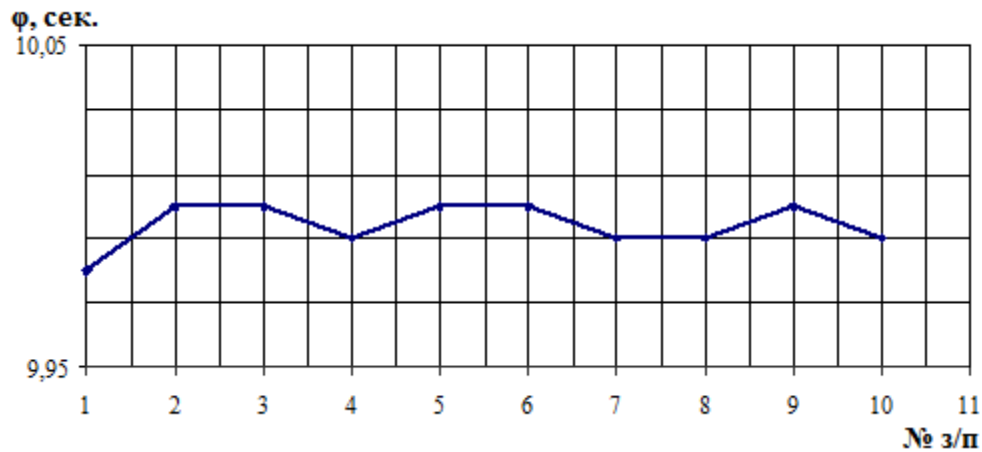


Рис. 3.11. Графічне представлення розподілення випадкових величин порівняно малої вибірки об'ємом $n = 10$ при вимірюванні плоского кута 18-гранної призми

3.6.3. Аналіз ефективності застосування пропонованого підходу визначення кількості вимірювань за методикою визначення оптимальної кількості вимірювань

Експериментальним моделюванням на комп'ютері для базового прикладу отриманий результат вимірювання величини плоского кута 24-гранної призми становить $\varphi = 164^\circ 59' (59,450 \pm 0,079)''$ при заданій точності статистичної вибірки $\varepsilon = 0,01''$ та довірчій ймовірності (надійності) $\alpha = 0,98$. Розрахунковий час проведення вимірювання для $K = 37$ становить приблизно 6 годин.

Для оцінки ефективності пропонованої методики використовувались відомі наукові результати [2], отримані без обґрунтованого визначення необхідної та достатньої кількості вимірювань. Так вимірювання плоского кута 24-гранної призми проводилося за 50 прийомів протягом 8 годин. Для кількості прийомів вимірювань $N = 50$ отриманий результат становить $\varphi = 164^\circ 59' (59,450 \pm 0,070)''$ точність складає приблизно $0,070''$ (табл. 3.5).

Моделюванням на комп'ютері отримано результати (див. табл. 3.6 – 3.8) вимірювання величини плоского кута базового прикладу – 24-гранної призми для K в інтервалі значень 3 до 120 вимірювань, що був обраний імперично.

Таблиця 3.5

Результати багаторазового вимірювання значень плоского кута
24-гранної призми ППСВК при $K = 50$

№ з/п	Виміряні значення кута, φ			$\Delta_k = \varphi_{ca} - \varphi_k$	Δ_k^2
	Град.	Хв.	Сек.	об/хв	об/хв
1	164	59	59,66	-0,21	0,0441
2	164	59	59,75	-0,3	0,09
3	164	59	59,84	-0,39	0,1521
4	164	59	59,74	-0,29	0,0841
5	164	59	59,84	-0,39	0,1521
6	164	59	59,67	-0,22	0,0484
7	164	59	59,73	-0,28	0,0784
8	164	59	59,61	-0,16	0,0256
9	164	59	59,86	-0,41	0,1681
10	164	59	59,81	-0,36	0,1296
11	164	59	59,28	0,17	0,0289
12	164	59	59,08	0,37	0,1369
13	164	59	59,11	0,34	0,1156
14	164	59	59,16	0,29	0,0841
15	164	59	59,18	0,27	0,0729
16	164	59	59,11	0,34	0,1156
17	164	59	59,37	0,08	0,0064
18	164	59	59,33	0,12	0,0144
19	164	59	59,37	0,08	0,0064
20	164	59	59,37	0,08	0,0064
21	164	59	59,42	0,03	0,0009
22	164	59	59,43	0,02	0,0004
23	164	59	59,36	0,09	0,0081
24	164	59	59,35	0,1	0,01
25	164	59	59,34	0,11	0,0121
26	164	59	59,27	0,18	0,0324
27	164	59	59,36	0,09	0,0081
28	164	59	59,05	0,4	0,16
29	164	59	59,18	0,27	0,0729
30	164	59	59,18	0,27	0,0729
31	164	59	59,43	0,02	0,0004
32	164	59	59,23	0,22	0,0484
33	164	59	59,66	-0,21	0,0441
34	164	59	59,75	-0,3	0,09
35	164	59	59,84	-0,39	0,1521
36	164	59	59,74	-0,29	0,0841
37	164	59	59,84	-0,39	0,1521
38	164	59	59,67	-0,22	0,0484
39	164	59	59,73	-0,28	0,0784
40	164	59	59,37	0,08	0,0064

Закінчення табл. 3.5

41	164	59	59,33	0,12	0,0144
42	164	59	59,37	0,08	0,0064
43	164	59	59,37	0,08	0,0064
44	164	59	59,42	0,03	0,0009
45	164	59	59,43	0,02	0,0004
46	164	59	59,28	0,17	0,0289
47	164	59	59,36	0,09	0,0081
48	164	59	59,32	0,13	0,0169
49	164	59	59,18	0,27	0,0729
50	164	59	59,35	0,1	0,01
Середнє арифметичне (дійсне значення кута) φ_{ca}			59,450	$\Sigma = 0,02$	$\Sigma = 2,808$
СКВ виміряних значень кута від середнього арифметичного (дійсного значення кута) $\tilde{\sigma}$			$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^K \Delta_i^2}{K-1}} \mid K = (1; 37)$		0,239
Довірчий інтервал Δ_{φ_k} випадкових результатів багаторазових вимірювань значення кута φ_k			$\Delta_{\varphi_k} = \varphi_{ca} \pm K_L \cdot \tilde{\sigma},$ де K_L – значення функції Лапласа, $K_L = 2,0$		$\pm K_L \cdot \tilde{\sigma} = (\pm 0,476)$
					$\Delta_{\varphi_s} = 59,928$
					$\Delta_{\varphi_n} = 58,972$
СКВ дійсного значення кута від істинного (математичного очікування)			$\tilde{\sigma}_{ca} = \frac{\tilde{\sigma}}{\sqrt{K}} \mid K = (1; 37)$		0,036
Довірчий інтервал Δ_{ca} результату вимірювання			$\Delta_{ca} = \pm K_{ca} \cdot \tilde{\sigma}_{ca}$ де K_{ca} – коефіцієнт Ст'юдента, $K_{ca} = 2,01$		$\pm K_{ca} \cdot \tilde{\sigma}_{ca} = (\pm 0,070)$
Надійність (довірча ймовірність) $\alpha [9, 10]$	0,98	Результат вимірювання		164° 59' 59,450" ± 0,070"	
Точність статистичної вибірки ε	0,01				

Графічне представлення розподілення випадкових величин при багаторазових ($K = 50$) вимірюваннях ППСВК плоского кута 24-граної призми приведено на рис. 3.15

Таблиця 3.6

Результати багаторазового вимірювання значень плоского кута
24-гранної призми ППСВК при $K = 60$

№ з/п	Виміряні значення кута, φ			$\Delta_k = \varphi_{ca} - \varphi_k$	Δ_k^2
	Град	Хв.	Сек.	об/хв	об/хв
1	164	59	59,66	-0,297166667	0,088308028
2	164	59	59,75	-0,387166667	0,149898028
3	164	59	59,84	-0,477166667	0,227688028
4	164	59	59,74	-0,377166667	0,142254694
5	164	59	59,84	-0,477166667	0,227688028
6	164	59	59,67	-0,307166667	0,094351361
7	164	59	59,73	-0,367166667	0,134811361
8	164	59	59,61	-0,247166667	0,061091361
9	164	59	59,86	-0,497166667	0,247174694
10	164	59	59,81	-0,447166667	0,199958028
11	164	59	59,28	0,082833333	0,006861361
12	164	59	59,08	0,282833333	0,079994694
13	164	59	59,11	0,252833333	0,063924694
14	164	59	59,16	0,202833333	0,041141361
15	164	59	59,18	0,182833333	0,033428028
16	164	59	59,11	0,252833333	0,063924694
17	164	59	59,37	-0,007166667	5,13611E-05
18	164	59	59,33	0,032833333	0,001078028
19	164	59	59,37	-0,007166667	5,13611E-05
20	164	59	59,37	-0,007166667	5,13611E-05
21	164	59	59,42	-0,057166667	0,003268028
22	164	59	59,43	-0,067166667	0,004511361
23	164	59	59,36	0,002833333	8,02778E-06
24	164	59	59,35	0,012833333	0,000164694
25	164	59	59,34	0,022833333	0,000521361
26	164	59	59,27	0,092833333	0,008618028
27	164	59	59,36	0,002833333	8,02778E-06
28	164	59	59,05	0,312833333	0,097864694
29	164	59	59,18	0,182833333	0,033428028
30	164	59	59,18	0,182833333	0,033428028
31	164	59	59,43	-0,067166667	0,004511361
32	164	59	59,23	0,132833333	0,017644694
33	164	59	59,28	0,082833333	0,006861361
34	164	59	59,36	0,002833333	8,02778E-06
35	164	59	59,32	0,042833333	0,001834694
36	164	59	59,18	0,182833333	0,033428028

Закінчення табл. 3.6

37	164	59	59,35	0,012833333	0,000164694
38	164	59	59,28	0,082833333	0,006861361
39	164	59	59,36	0,002833333	8,02778E-06
40	164	59	59,32	0,042833333	0,001834694
41	164	59	59,18	0,182833333	0,033428028
42	164	59	59,35	0,012833333	0,000164694
43	164	59	59,36	0,002833333	8,02778E-06
44	164	59	59,35	0,012833333	0,000164694
45	164	59	59,34	0,022833333	0,000521361
46	164	59	59,27	0,092833333	0,008618028
47	164	59	59,36	0,002833333	8,02778E-06
48	164	59	59,05	0,312833333	0,097864694
49	164	59	59,18	0,182833333	0,033428028
50	164	59	59,32	0,042833333	0,001834694
51	164	59	59,35	0,012833333	0,000164694
52	164	59	59,34	0,022833333	0,000521361
53	164	59	59,27	0,092833333	0,008618028
54	164	59	59,36	0,002833333	8,02778E-06
55	164	59	59,05	0,312833333	0,097864694
56	164	59	59,18	0,182833333	0,033428028
57	164	59	59,32	0,042833333	0,001834694
58	164	59	59,37	-0,007166667	5,13611E-05
59	164	59	59,42	-0,057166667	0,003268028
60	164	59	59,43	-0,067166667	0,004511361
Середнє арифметичне (дійсне значення кута) φ_{ca}			59,450	$\Sigma = 0,02$	$\Sigma = 2,808$
СКВ виміряних значень кута від середнього арифметичного (дійсного значення кута) $\tilde{\sigma}$			$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^K \Delta_i^2}{K-1}} \mid K = (1; 37)$		0,239
Довірчий інтервал Δ_{φ_k} випадкових результатів багаторазових вимірювань значення кута φ_k			$\Delta_{\varphi_k} = \varphi_{ca} \pm K_L \cdot \tilde{\sigma}$, де K_L – значення функції Лапласа, $K_L = 2,0$		$\pm K_L \cdot \tilde{\sigma} = (\pm 0,476)$
					$\Delta_{\varphi_s} = 59,928$
					$\Delta_{\varphi_n} = 58,972$
СКВ дійсного значення кута від істинного (математичного очікування)			$\tilde{\sigma}_{ca} = \frac{\tilde{\sigma}}{\sqrt{K}} \mid K = (1; 37)$		0,032
Довірчий інтервал Δ_{ca} результату вимірювання			$\Delta_{ca} = \pm K_{ca} \cdot \tilde{\sigma}_{ca}$ де K_{ca} – коефіцієнт Ст'юдента, $K_{ca} = 2,01$		$\pm K_{ca} \cdot \tilde{\sigma}_{ca} = (\pm 0,068)$
Надійність (довірча ймовірність) α [9, 10]	0,98	Результат вимірювання		164° 59' 59,450" ± 0,068"	
Точність статистичної вибірки ε	0,01				

Графічне представлення розподілення випадкових величин при багаторазових ($K = 60$) вимірюваннях ППСВК плоского кута 24-гранної призми приведено на рис. 3.16

Таблиця 3.7

Результати багаторазового вимірювання значень плоского кута
24-гранної призми ППСВК при $K = 120$

№ з/п	Виміряні значення кута, φ			$\Delta_k = \varphi_{\text{са}} - \varphi_k$, об/хв	Δ_k^2 , об/хв
	Град	Хв.	Сек.		
1	164	59	59,66	-0,197899242	0,03916411
2	164	59	59,75	-0,287899242	0,082885974
3	164	59	59,84	-0,377899242	0,142807837
4	164	59	59,74	-0,277899242	0,077227989
5	164	59	59,84	-0,377899242	0,142807837
6	164	59	59,67	-0,207899242	0,043222095
7	164	59	59,73	-0,267899242	0,071770004
8	164	59	59,61	-0,147899242	0,021874186
9	164	59	59,86	-0,397899242	0,158323807
10	164	59	59,81	-0,347899242	0,121033883
11	164	59	59,28	0,182100758	0,033160686
12	164	59	59,08	0,382100758	0,146000989
13	164	59	59,11	0,352100758	0,123974943
14	164	59	59,16	0,302100758	0,091264868
15	164	59	59,18	0,282100758	0,079580837
16	164	59	59,11	0,352100758	0,123974943
17	164	59	59,37	0,092100758	0,00848255
18	164	59	59,33	0,132100758	0,01745061
19	164	59	59,37	0,092100758	0,00848255
20	164	59	59,37	0,092100758	0,00848255
21	164	59	59,42	0,042100758	0,001772474
22	164	59	59,43	0,032100758	0,001030459
23	164	59	59,36	0,102100758	0,010424565
24	164	59	59,35	0,112100758	0,01256658
25	164	59	59,34	0,122100758	0,014908595
26	164	59	59,27	0,192100758	0,036902701
27	164	59	59,36	0,102100758	0,010424565
28	164	59	59,05	0,412100758	0,169827034
29	164	59	59,18	0,282100758	0,079580837
30	164	59	59,18	0,282100758	0,079580837
31	164	59	59,43	0,032100758	0,001030459
32	164	59	59,23	0,232100758	0,053870762
33	164	59	59,28	0,182100758	0,033160686
34	164	59	59,36	0,102100758	0,010424565
35	164	59	59,32	0,142100758	0,020192625
36	164	59	59,18	0,282100758	0,079580837
37	164	59	59,35	0,112100758	0,01256658
38	164	59	59,28	0,182100758	0,033160686
39	164	59	59,36	0,102100758	0,010424565
40	164	59	59,32	0,142100758	0,020192625

Продовження табл. 3.7

41	164	59	59,18	0,282100758	0,079580837
42	164	59	59,35	0,112100758	0,01256658
43	164	59	59,36	0,102100758	0,010424565
44	164	59	59,35	0,112100758	0,01256658
45	164	59	59,34	0,122100758	0,014908595
46	164	59	59,27	0,192100758	0,036902701
47	164	59	59,36	0,102100758	0,010424565
48	164	59	59,05	0,412100758	0,169827034
49	164	59	59,18	0,282100758	0,079580837
50	164	59	59,32	0,142100758	0,020192625
51	164	59	59,35	0,112100758	0,01256658
52	164	59	59,34	0,122100758	0,014908595
53	164	59	59,27	0,192100758	0,036902701
54	164	59	59,36	0,102100758	0,010424565
55	164	59	59,05	0,412100758	0,169827034
56	164	59	59,18	0,282100758	0,079580837
57	164	59	59,32	0,142100758	0,020192625
58	164	59	59,37	0,092100758	0,00848255
59	164	59	59,42	0,042100758	0,001772474
60	164	59	59,66	-0,197899242	0,03916411
61	164	59	59,75	-0,287899242	0,082885974
62	164	59	59,84	-0,377899242	0,142807837
63	164	59	59,74	-0,277899242	0,077227989
64	164	59	59,84	-0,377899242	0,142807837
65	164	59	59,364	0,09782803	0,009570324
66	164	59	59,371	0,09082803	0,008249731
67	164	59	59,378	0,08382803	0,007027139
68	164	59	59,385	0,07682803	0,005902546
69	164	59	59,84	-0,377899242	0,142807837
70	164	59	59,74	-0,277899242	0,077227989
71	164	59	59,84	-0,377899242	0,142807837
72	164	59	59,67	-0,207899242	0,043222095
73	164	59	59,73	-0,267899242	0,071770004
74	164	59	59,61	-0,147899242	0,021874186
75	164	59	59,86	-0,397899242	0,158323807
76	164	59	59,81	-0,347899242	0,121033883
77	164	59	59,34	0,122100758	0,014908595
78	164	59	59,27	0,192100758	0,036902701
79	164	59	59,36	0,102100758	0,010424565
80	164	59	59,05	0,412100758	0,169827034
81	164	59	59,18	0,282100758	0,079580837
82	164	59	59,32	0,142100758	0,020192625
83	164	59	59,35	0,112100758	0,01256658
84	164	59	59,34	0,122100758	0,014908595
85	164	59	59,61	-0,147899242	0,021874186
86	164	59	59,86	-0,397899242	0,158323807
87	164	59	59,81	-0,347899242	0,121033883
88	164	59	59,34	0,122100758	0,014908595
89	164	59	59,27	0,192100758	0,036902701
90	164	59	59,36	0,102100758	0,010424565
91	164	59	59,35	0,112100758	0,01256658
92	164	59	59,36	0,102100758	0,010424565
93	164	59	59,35	0,112100758	0,01256658

Закінчення табл. 3.7

94	164	59	59,34	0,122100758	0,014908595
95	164	59	59,27	0,192100758	0,036902701
96	164	59	59,36	0,102100758	0,010424565
97	164	59	59,05	0,412100758	0,169827034
98	164	59	59,595	-0,13317197	0,017734774
99	164	59	59,602	-0,14017197	0,019648181
100	164	59	59,609	-0,14717197	0,021659589
101	164	59	59,616	-0,15417197	0,023768996
102	164	59	59,623	-0,16117197	0,025976404
103	164	59	59,63	-0,16817197	0,028281811
104	164	59	59,637	-0,17517197	0,030685219
105	164	59	59,644	-0,18217197	0,033186627
106	164	59	59,651	-0,18917197	0,035786034
107	164	59	59,658	-0,19617197	0,038483442
108	164	59	59,665	-0,20317197	0,041278849
109	164	59	59,672	-0,21017197	0,044172257
110	164	59	59,679	-0,21717197	0,047163664
111	164	59	59,686	-0,22417197	0,050253072
112	164	59	59,693	-0,23117197	0,05344048
113	164	59	59,7	-0,23817197	0,056725887
114	164	59	59,707	-0,24517197	0,060109295
115	164	59	59,714	-0,25217197	0,063590702
116	164	59	59,721	-0,25917197	0,06717011
117	164	59	59,728	-0,26617197	0,070847517
118	164	59	59,735	-0,27317197	0,074622925
119	164	59	59,742	-0,28017197	0,078496333
120	164	59	59,43	0,032100758	0,001030459
Середнє арифметичне (дійсне значення кута) φ_{ca}			59,45	$\Sigma = 0,000$	$\Sigma = 6,304$
СКВ виміряних значень кута від середнього арифметичного (дійсного значення кута) $\tilde{\sigma}$			$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^K \Delta_i^2}{K-1}} \mid K = (1; 37)$		0,230
Довірчий інтервал Δ_{φ_k} випадкових результатів багаторазових вимірювань значення кута φ_k			$\Delta_{\varphi_k} = \varphi_{ca} \pm K_L \cdot \tilde{\sigma}$, де K_L – значення функції Лапласа, $K_L = 2,0$		$\pm K_L \cdot \tilde{\sigma} = (\pm 0,476)$
					$\Delta_{\varphi_s} = 59,922$
					$\Delta_{\varphi_n} = 59,002$
СКВ дійсного значення кута від істинного (математичного очікування)			$\tilde{\sigma}_{ca} = \frac{\tilde{\sigma}}{\sqrt{K}} \mid K = (1; 37)$		0,030
Довірчий інтервал Δ_{ca} результату вимірювання			$\Delta_{ca} = \pm K_{ca} \cdot \tilde{\sigma}_{ca}$ де K_{ca} – коефіцієнт Ст'юдента, $K_{ca} = 2,00$		$\pm K_{ca} \cdot \tilde{\sigma}_{ca} = (\pm 0,062)$
Надійність (довірча ймовірність) $\alpha [9, 10]$	0,98	Результат вимірювання		164° 59' 59,45" ± 0,06"	
Точність статистичної вибірки ε	0,01				

Графічне представлення розподілення випадкових величин при багаторазових ($K = 120$) вимірюваннях ППСВК плоского кута 24-гранної призми приведено на рис. 3.11.



Рис. 3.12. Графічне представлення розподілення випадкових величин при багаторазових ($K = 50$) вимірюваннях ППСВК плоского кута 24-гранної призми



Рис. 3.13. Графічне представлення розподілення випадкових величин при багаторазових ($K = 60$) вимірюваннях ППСВК плоского кута 24-гранної призми



Рис. 3.14. Графічне представлення розподілення випадкових величин при багаторазових ($K = 120$) вимірюваннях ППСВК плоского кута 24-гранної призми

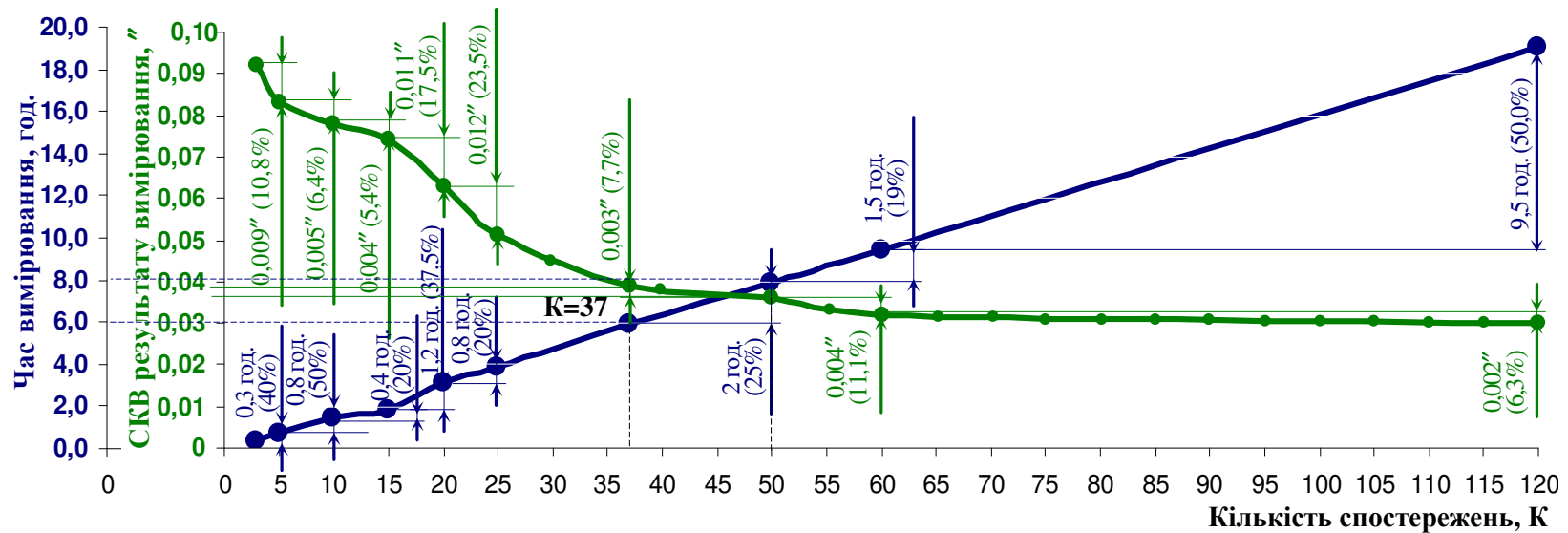


Рис. 3.15. Графічна інтерпретація результатів застосування пропонованого підходу визначення кількості вимірювань за методикою розрахунку необхідної та достатньої кількості вимірювань

Основні результати експериментальних досліджень ефективності пропонованого підходу щодо визначення кількості вимірювань за пропонованою методикою розрахунку необхідної та достатньої кількості вимірювань кутів пропонованою ППСВК приведені у зведеній таблиці даних (табл. 3.8). Графічна інтерпретація отриманих результатів приведена на рис. 3.18.

Таблиця 3.8

Кількість спостережень, К	Час вимірювання, год.	Градiєнт збільшення часу вимірювання		Результат вимірювання $\varphi_{ca} \pm \Delta_{ca}$, кут. сек.	СКВ результату вимірювання, кут. сек.	Градiєнт зменшення СКВ результату вимірювання	
		год.	%			кут. сек.	%
K=3	0,5	—	—	59,75±0,22	0,092	—	—
K=5	0,8	0,3	40,0	59,75±0,12	0,083	0,009	10,8
K=10	1,6	0,8	50,0	59,74±0,10	0,078	0,005	6,4
K=15	2,0	0,4	20,0	59,55±0,21	0,074	0,004	5,4
K=20	3,2	1,2	37,5	59,55±0,13	0,063	0,011	17,5
K=25	4,0	0,8	20,0	59,471±0,11	0,051	0,012	23,5
K=30	4,8	0,8	16,7	59,467±0,097	0,048	0,003	6,2
K=35	5,6	0,8	14,3	59,457±0,09	0,040	0,008	20,0
K=37	6,0	0,4	6,7	59,450±0,079	0,039	0,001	2,6
K=40	6,5	0,5	7,7	59,450±0,076	0,039	0	0,0
K=45	7,2	0,7	9,7	59,450±0,073	0,037	0,002	5,4
K=50	8,0	0,8	10,0	59,450±0,070	0,036	0,001	2,8
K=55	8,8	0,8	9,1	59,450±0,069	0,035	0,001	2,9
K=60	9,5	0,7	7,4	59,450±0,068	0,032	0,003	9,4
K=65	10,5	1,0	9,5	59,450±0,067	0,031	0,001	3,2
K=70	11,2	0,7	6,2	59,4500±0,0667	0,031	0	0,0
K=75	12,0	0,8	6,7	59,4500±0,0666	0,031	0	0,0
K=80	13,0	1,0	7,7	59,4500±0,0665	0,031	0	0,0
K=85	13,5	0,5	3,7	59,4500±0,0665	0,031	0	0,0
K=90	14,5	1,0	6,9	59,450±0,062	0,030	0,001	3,3
K=95	15,0	0,5	3,3	59,4500±0,061	0,030	0	0,0
K=100	16,0	1,0	6,3	59,4500±0,0609	0,030	0	0,0
K=105	16,8	0,8	4,8	59,4500±0,0607	0,030	0	0,0
K=110	17,5	0,7	4,0	59,4500±0,0606	0,030	0	0,0
Л=115	18,5	1,0	5,4	59,4500±0,0605	0,030	0	0,0
K=120	19,2	0,7	3,6	59,4500±0,0604	0,030	0	0,0
Кількість спостережень	Час вимірювання, год.	Градiєнт зміни часу		СКВ результату вимірювання, кут. сек.		Градiєнт зміни СКВ	
		год.	%			кут. сек.	%
K=37	6,0	2	25	0,039		0,003	7,7
K=50	8,0			0,036			

Із приведенного в табл. 3.8 видно, що при застосуванні пропонованого підходу та методики щодо визначення необхідної та достатньої кількості вимірювань кутів ППСВК, отримується вибірка, розмір якої є достатнім для забезпечення високої точності (при заданій точності статистичної вибірки 0,01") отримуваних результатів вимірювання. При цьому час проведення експерименту суттєво скорочується (на 25 %) порівняно із відомими результатами наукових досліджень [2].

Таким чином можна стверджувати, що запропонована методика дозволила обґрунтувати кількість спостережень при багаторазових вимірюваннях, зменшити їх кількість приблизно у 1,4 рази порівняно із відомою роботою (тобто із 50 до 37 вимірювань), в результаті чого підвищено швидкодію у 1,3 рази або на 25 % порівняно із відомими дослідженнями при вимірюванні кутів з позитивним декрементом точності.

При цьому основним припущенням при використанні пропонованого підходу та методики визначення необхідної кількості вимірювань, що буде достатньою для досягнення заданої точності є те, що випадкові похибки підпорядковуються нормальному закону розподілу випадкових величин.

Висновки до розділу 3

1. Розроблено новітню математичну модель похибки пропонованої ППСВК в частині врахування похибки фоточутливої КМОП-матриці шляхом виокремлення флуктуаційних напруг, які виникають на пікселях матриці через дробовий та тепловий ефекти, а також врахуванням нестабільності швидкості обертання Землі навколо своєї осі, що має вплив на дрейф масштабного коефіцієнту КЛ. Виконане в результаті дало можливість їх комплексного врахування при визначенні похибок та підвищити точність вимірювання пропонованої ППСВ на 20 % на відміну від відомих.

2. Запропоновано підхід та методику визначення необхідної кількості спостережень при багаторазових вимірюваннях, яка достатня для досягнення заданої точності та використовується при нормуванні випадкових складових похибок вимірювання кутів.

3. Експериментально (шляхом комп'ютерного моделювання) доведено, що запропонована методика дозволила обґрунтувати кількість спостережень при багаторазових вимірюваннях 24-гранної призми, що обрана в якості базового прикладу, в результаті чого було підвищено швидкодію у 1,3 рази або на 25 % порівняно із відомими науковими результатами наведеними в літературі [2] при вимірюванні кутів з позитивним декрементом точності.

Перелік літератури до розділу 3

1. Шевчук В. П. Метрология интеллектуальных измерительных систем: Монография / В. П. Шевчук, В. И. Капля, А. П. Желтоногов, Д. Н. Лясин. ВолгГТУ, Волгоград, 2005. – 210 с.
2. Безвесільна О. М. Автоматизований прецизійний пристрій для вимірювання кутів: Монографія. – Житомир: ЖДТУ, 2010. – 258 с.
3. Коротаев В. В. Точность измерительных оптико-электронных приборов и систем. Учебное пособие. / В. В. Коротаев. – Санкт-Петербург, 2011. – 42 с.
4. Гончаров Н. В. Разработка и исследование динамического гониометра на основе фотоэлектрического преобразователя угла: автореф. дис. канд. т. наук. 05.11.16: “Информационно-измерительные и управляющие системы” / Н. В. Гончаров. – Санкт-Петербург, 2005. – 20 с.
5. Николаев М. С. Разработка и исследование методов измерения межгранных углов прозрачных призм на основе динамического гониометра: автореф. дис. ...канд. т. наук: 05.11.16 “Информационно-измерительные и управляющие системы” / М. С. Николаев. – Санкт-Петербург, 2012. – 12 с.
6. Иващенко Е. М. Разработка методов исследования динамических гониометров для калибровки преобразователей угла: автореф. дис. ...канд. т. наук: 05.11.16 “Информационно-измерительные и управляющие системы” / Иващенко Е. М. – Санкт-Петербург, 2013. – 14 с.
7. Корнышева С. В. Измерение показателя преломления методом лазерной динамической гониометрии: автореф. дис. ...канд. т. наук: 01.04.05 “Оптика” / С. В. Корнышева. – Москва, 2012. – 20 с.
8. Павлов П. А. Разработка и исследование высокоточных лазерных

гонометрических систем: автореф. дис. ...др – а. т. наук: 05.11.16 “Информационно-измерительные и управляющие системы” / Павлов П. А. – Санкт-Петербург, 2008. – 44 с.

9. Колкер Я. Д. Математический анализ точности механической обработки деталей / Я. Д. Колкер – К.: Техника, 1976. – 200 с.

10. Томашевський В. М. Моделювання систем / Томашевський В. М. – К.: Видавнича група BHV, 2005. – 352 с.

11. Гихман И. И., Скороход А. В., Ядренко М. И. Теория вероятностей и математическая статистика. – Киев: Вища школа., 1988. – 439 с.

12. Теория вероятностей. Сборник задач. /Под общ. ред, чл. – кор. АН УССР А. В. Скорохода. – Киев: Головное изд-во, 1980. – 432 с.

13. Ефремов Л. В. Проблемы учёта случайных и систематических погрешностей в прямых многократных измерениях / Л. В. Ефремов // Мир измерений. – 2012. – №10. – С. 52 – 57.

14. Гвоздев В. Д. Измерения однократные и многократные: критерий ничтожной погрешности / В. Д. Гвоздев // Законодательная и прикладная метрология. – 2012. – №2.

15. Павлов П. А. Метод уменьшения случайной погрешности лазерного динамического гониометра / П. А. Павлов // Измерительная техника. – 2008. – № 7. – С. 25 – 28.

16. Kazunori Akizuki. The effect of proficiency level on measurement error of range of motion / Kazunori Akizuki, Kazuto Yamaguchi, Yoshiyuki Morita, Yukari Ohashi // Journal of Physical Therapy Science. – 2016. – Sep.; 28(9). – pp. 2644 – 2651. www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5080194/

17. Silvio Nussbaumer. Validity and test – retest reliability of manual goniometers for measuring passive hip range of motion in femoroacetabular impingement patients / Silvio Nussbaumer, Michael Leunig, Julia F Glatthorn, Simone Stauffacher, Hans Gerber, Nicola A Maffiuletti // BMC Musculoskelet Disord. – 2010. – 11, Published online 2010, Aug 31 www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2942800

18. Pavlov P. A. A method of reducing the random error of a dynamic laser goniometer / P. A. Pavlov // Article July 2008. with 11 Reads www.researchgate.net/publication/245251208

19. Койчубеков Б. К. Определение размера выборки при планировании научного исследования / Б. К. Койчубеков, М. А. Сорокина, К. Э. Мхитарян // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 4 – С. 71 – 74
20. Русупов В. Л. Методы определения количества экспертов / В. Л. Русупов // Вестник ИрГТУ. – 2015. – №3 (98). – С. 286 – 292.
21. ДСТУ ГОСТ 8.009:2008 (ГОСТ 8.009 – 84, IDT). Державна система забезпечення єдності вимірювань. Нормовані метрологічні характеристики засобів вимірювань [Текст]. – Чинний від 2008 – 10 – 01. – М.: Стандартиформ, 2006. – 26 с. 8. ГОСТ 8.508 – 84.
22. ДСТУ – Н РМГ 63:2013. Державна система забезпечення вимірювань. Забезпечення ефективності вимірювань при управлінні технологічними процесами. Київ, 2013. 18 с.
23. ДСТУ 2681 – 94. Державна система забезпечення єдності вимірювань. Метрологія. Терміни та визначення [Текст]. – Чинний від 1995–01–01. – Київ: Держстандарт України, 1994. – 66 с.
24. ГОСТ 8.508 – 84. ГСИ. Метрологические характеристики средств измерений и точностные характеристики средств автоматизации ГСП. Общие методы оценки и контроля [Текст]. – Введ. 1985–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 53 с.
25. Заико А. И. Состояние и перспективы комплексного подхода к определению погрешностей измерения / А. И. Заико // Вестник УГАТУ. – 2007. – Т.9. № 6(24). – С. 23 –32.
26. Бакер Альравашдех, М. П. Сергиенко Проблемы стандартизации в области динамических измерений // Системы обработки информации. – 2016.– №6(143). – С. 7–12.
27. Филатов Ю. В. Оптические гироскопы / Ю. В. Филатов. Санкт-Петербург – 2005. – 139 с.
28. Порцевський А. К. Выбор рациональной технологии добычи руд. Геомеханическая оценка состояния недр. Использование подземного пространства. Геоэкология. – М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2003. – 767 с.

29. Сидоренков Н. С. О синхронизации атмосферных процессов с частотами системы Земля – Луна – Солнце / Н. С. Сидоренков // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. – 2016. – №359. – С.33.–47

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА АРХІТЕКТУР ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ПРЕЦИЗІЙНОЇ ПРИЛАДОВОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ

4.1. Сутність проблеми декомпозиції (розпізнавання) систематичних та випадкових складових похибок вимірювання у результатах спостережень при багаторазових вимірюваннях

Одними із показників ефективності функціонування вимірювальних систем є точність та швидкодія. З роботи [1] відомо, що при забезпеченні ефективності вимірювань в різних технологічних процесах, особливо приладо- та машинобудування, більшість метрологічних задач в частині обробки результатів вимірювання розв'язується наближено. Це обумовлюється обмеженістю можливостей застосування коректних метрологічних методів обробки вимірювальної інформації. Вказане пов'язано з тим, що більшість методів направлених на забезпечення ефективності вимірювань характеризуються значною трудомісткістю для персоналу, який повинен приймати ці рішення та здійснювати обробку вимірювальної інформації в умовах дефіциту часу, оперуючи при цьому великими об'ємами нормативної інформації.

Варто вказати, що підвищення точності можна досягти як за рахунок удосконалення методів та засобів вимірювання так і за рахунок вдосконалення обчислювальних алгоритмів та їх автоматизації. Це дозволяє забезпечити задану точність менш витратними, проте не менш ефективними способами. Також забезпечення високої точності вимірювань, окрім застосування технічних засобів з покращеними метрологічними характеристиками та удосконалених методів вимірювання, обчислювальних алгоритмів та інших процедур (зокрема ШНМ), досягається шляхом додаткового застосування цілого комплексу спеціальних заходів. Зокрема – підвищенням вимог до кваліфікації персоналу, жорсткого дотримання графіків повірки обладнання, ретельністю виконання типових та сертифікаційних досліджень та

дотриманням методик вимірювання, обчислення і нормування складових похибок вимірювання.

Методичні, інструментальні та суб'єктивні похибки є джерелами виникнення похибок вимірювання запропонованою ППСВК, що проявляються в результатах вимірювання у вигляді *систематичних* та *випадкових* складових [2] зміна яких у часі являє собою нестационарний випадковий процес [3]. Процедури обробки результатів вимірювань, а також нормування систематичних та випадкових складових похибок вимірювання відомі, мають багаторічну практику застосування, добре обґрунтовані, максимально формалізовані, є принципово різними та регламентуються відповідними нормативними документами [4, 5]. Зокрема, відповідно до стандарту [4] похибки підсумовують одним із трьох способів – алгебраїчним, геометричним, з врахуванням кореляції. Зокрема при наявності *випадкової* складової похибки вимірювання використовують геометричне підсумовування за виразом (4.1).

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2}, \quad (4.1)$$

де σ_{Σ} – сумарна величина випадкової похибки за всіма результатами спостереження;

σ_i – середнє квадратичне значення i -ї похибки;

N – кількість результатів спостереження.

При наявності *систематичної* складової похибки вимірювання вибір способу підсумовування є неоднозначним. Це обумовлюється відсутністю повної інформації про закон її розподілення та чітких вказівок і рекомендацій ДСТУ 8.009:2008 [4]. В такому випадку вибір способу підсумовування проводять виходячи з міркувань ймовірності виникнення небезпеки життю людей, значних економічних збитків, техногенних катастроф тощо. Як правило, в такому випадку використовують алгебраїчний спосіб підсумовування за виразом (4.2), хоча це досить часто призводить до завищеної оцінки величини похибки.

$$\sigma_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \Delta_i, \quad (4.2)$$

де σ_{Σ} – величина сумарної похибки;

Δ_i – величина i -ої похибки;

i – номер похибки;

N – кількість похибок.

Крім того ДСТУ 8.009:2008 [4] передбачає використання так званого проміжного варіанту між геометричним та алгебраїчним підсумовуванням похибок:

$$\sigma_{\Sigma} = K \sqrt{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2}, \quad (4.3)$$

де K – поправочний коефіцієнт, значення якого становить $K = 1,2$ для найбільш важливих параметрів пристроїв аварійного захисту та блокування, для забезпечення вимог техніки безпеки, екологічної безпеки тощо.

Підсумовування похибок за виразом (4.3) призводить до зниження точності. Тому, дуже важливим є попередній аналіз результатів спостереження та декомпозиція похибок вимірювання на складові (систематичні та випадкові) для визначення того, яка саме складова похибки міститься у множині вимірювальних даних. Адже правильне визначення складових похибок у результатах вимірювання дозволяє коректно застосовувати відповідні методи обробки вимірювальних даних, уникати хибностей та неточностей в результаті чого підвищується точність вимірювань в цілому.

4.2. Методи визначення систематичних та випадкових складових похибок вимірювання за принципом декомпозиції

Для визначення складових похибок вимірювання у вітчизняній [3] та в зарубіжній [6] літературі наводяться аналітично-розрахункові методи, що базуються на застосуванні дисперсійного критерію Фішера та критерію

Віллоксона. Дисперсійний критерій Фішера дозволяє встановити факт наявності систематичної складової похибки вимірювання та проаналізувати джерела її виникнення, а критерій Віллоксона застосовується для виявлення систематичної складової похибки вимірювання при невідомому законі розподілення результатів вимірювання. Вважається, що найбільш ефективним є застосування дисперсійного критерію Фішера. При цьому науковці у своїх роботах [3, 6] вказують, що визначення складових похибок вимірювання із застосуванням цих аналітично-розрахункових методів є багатоетапним [3], рутинним [6] та відповідно досить трудомістким процесом, що вимагає значних витрат часу.

4.2.1. Аналітично-розрахунковий метод визначення складових похибок вимірювання із застосуванням дисперсійного критерію Фішера

Аналітично-розрахунковий метод на основі дисперсійного критерію Фішера виконується на етапі аналізу результатів вимірювання для декомпозиції складових похибок вимірювання. Він передбачає виконання певної послідовності кроків і може бути представлений у вигляді чіткого алгоритму. Узагальнена блок-схема алгоритму, що ілюструє роботу цього методу приведена на рис. 4.1.

Реалізація алгоритму здійснюється за 15 кроків, за які оператором виконується 223 математичних операції, зокрема 114 операцій додавання, 46 – віднімання, 46 – множення та 17 – ділення. У наукових роботах [3, 6] науковці підкреслюють значну трудомісткість процесу визначення складових похибки вимірювання за критерієм Фішера.

Для прикладу в табл. 4.1 приведено результати аналітичного визначення складових похибки вимірювання за приведеним алгоритмом при вимірюванні плоского кута 24-гранної призми. Визначення складових похибки вимірювання проводилось на попередньо визначеній за пропонованою методикою [21] множині результатів спостереження $K = 37$ (для зручності розрахунків прийнято $K = 40$).

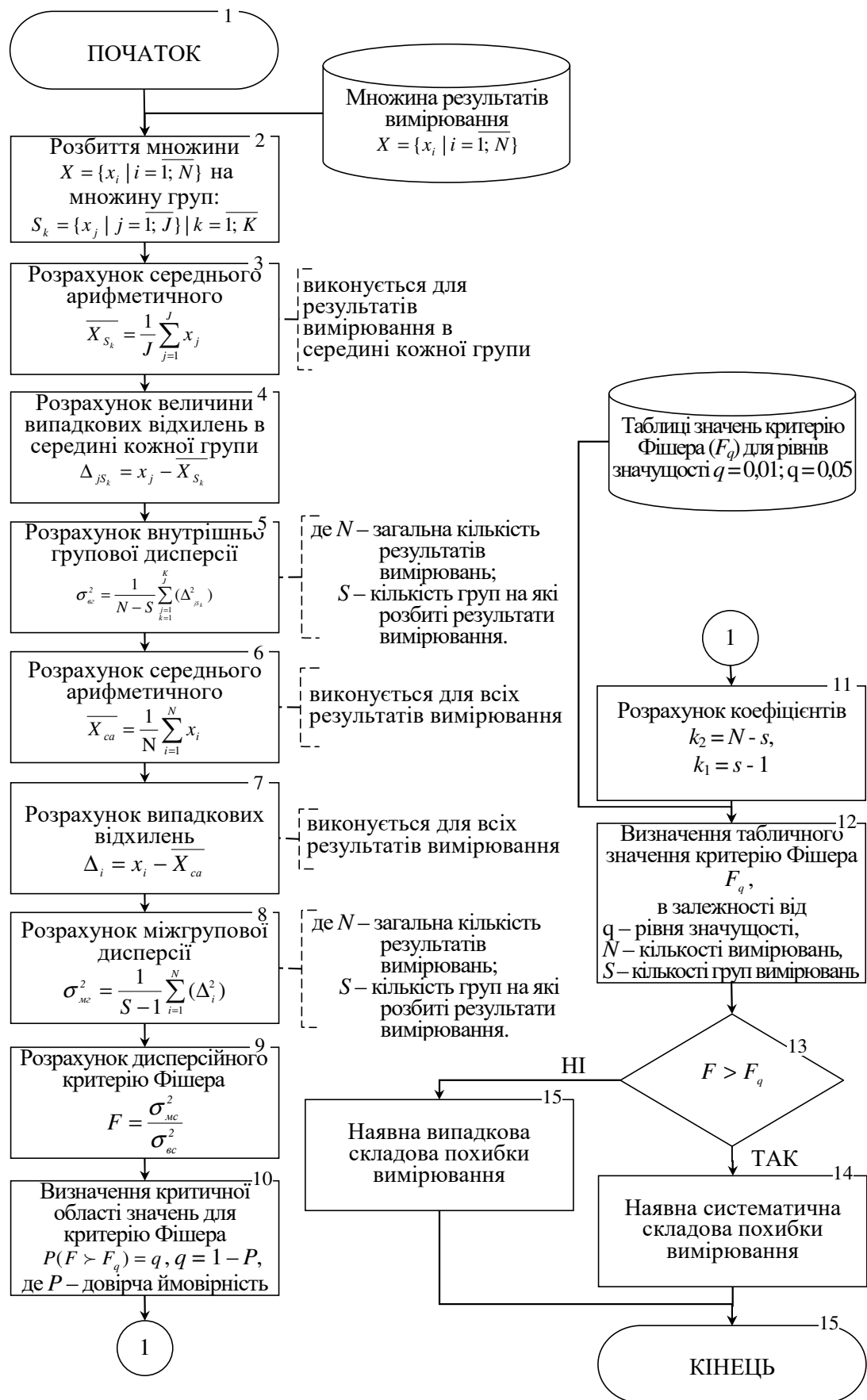


Рис. 4.1. Блок-схема алгоритму аналітично-розрахункового методу визначення складових похибок вимірювання із застосуванням дисперсійного критерію Фішера

Таблиця 4.1

Результати аналітичного визначення складових похибки вимірювання при багаторазовому вимірюванні значень плоского кута 24-гранної призми із застосуванням дисперсійного критерію Фішера

№ з/п	Виміряні значення кута, φ_k			№ з/п	Виміряні значення кута, φ_k			№ з/п	Виміряні значення кута, φ_k		
	град.	хв.	сек.		град.	хв.	сек.		град.	хв.	сек.
1	164	59	59,66	14	164	59	59,16	27	164	59	59,36
2	164	59	59,75	15	164	59	59,18	28	164	59	59,05
3	164	59	59,84	16	164	59	59,11	29	164	59	59,18
4	164	59	59,74	17	164	59	59,37	30	164	59	59,18
5	164	59	59,84	18	164	59	59,33	31	164	59	59,43
6	164	59	59,67	19	164	59	59,37	32	164	59	59,23
7	164	59	59,73	20	164	59	59,37	33	164	59	59,28
8	164	59	59,61	21	164	59	59,42	34	164	59	59,36
9	164	59	59,86	22	164	59	59,43	35	164	59	59,32
10	164	59	59,81	23	164	59	59,36	36	164	59	59,18
11	164	59	59,28	24	164	59	59,35	37	164	59	59,35
12	164	59	59,08	25	164	59	59,34	—	—	—	—
13	164	59	59,11	26	164	59	59,27	—	—	—	—
Значення критерію Фішера											
розрахункове F				табличне F_q							
				$F_{0,01} \mid P = 0,99$				$F_{0,05} \mid P = 0,95$			
2,39				4,41				2,88			
Висновок: У результатах вимірювання наявна випадкова складова похибки вимірювання											

За аналітично-розрахунковою процедурою визначення складових похибок вимірювання із застосуванням дисперсійного критерію Фішера встановлено, що у результатах вимірювання наявна випадкова складова похибки. Тому при обробці результатів вимірювання та нормуванні випадкової похибки повинні бути застосовані методи математичної статистики та теорії ймовірності, а підсумовування повинно здійснюватись геометричним способом за виразом (4.1), що регламентовано нормативними документами [4, 5].

Доцільно звернути увагу, що для підвищення точності при вимірюваннях проводять як правило багаторазові спостереження, кількість K результатів яких може бути досить великою. В такому випадку очевидним є значне збільшення часу вимірювань.

4.2.2. Методи автоматичного визначення складових похибок вимірювання за принципом декомпозиції

Підвищити швидкодію вимірювань дозволяє автоматизація обробки вимірювальної інформації, в тому числі при визначенні складових похибок вимірювання за принципом декомпозиції, шляхом виконання експрес-аналізу вимірювальної інформації. Досягнення вказаного можливе за рахунок застосування нейромережових технологій. Відомо, що ШНМ успішно використовуються для розв'язання різноманітних задач обробки та аналізу даних в умовах неповноти, суперечливості та динамічності вхідної інформації в режимі реального часу на основі методів її паралельної обробки.

Відомим є застосування ШНМ в алгоритмі оцінки кутів згинання колін [7], в методиці прогнозування кута згинання суглобу пальця [8]. Відоме застосування ШНМ в методиці оцінки кута та швидкості повороту ротору генератора, зокрема для оцінки стійкості та контролю перехідних процесів в режимі реального часу [9]. Також відома система автоматизованого вимірювання кута Кобба на основі ШНМ, для проведення оцінки сколіозу хребта [10]. У публікаціях стверджується, що застосування ШНМ дозволяє підвищити продуктивність, надійність та точність виконуваних робіт. У публікації [11] приводиться алгоритм застосування нейронної мережі для витягу аерозольних властивостей із наземних спектрополяриметричних вимірювань, та вказується, що використання ШНМ призводить до більш точних оцінок. У публікації [12] приводиться спосіб визначення кутів в рівнянні Болера з використанням ШНМ, для діагностування та лікування переломів кісток. Приведені результати вказують на високу точність. У публікації [13] представлено метод автоматичного вимірювання кута повороту двомірного об'єкту з використанням одношарової нейронної мережі. В публікації [13] приводиться метод калібрування датчика кута на основі ШНМ. Авторами доведено, що ШНМ має перевагу, яка полягає в її більшій продуктивності та вищій точності. Також вказується, що ШНМ може бути новим методом ефективної корекції похибок.

Також відома низка робіт в яких вирішуються задачі підвищення точності вимірювань шляхом автоматизованого визначення похибок на основі використання ШНМ [14, 15, 17, 18], генетичних алгоритмів [19], а також

інших засобів [20].

В роботі [14] ШНМ використовується для оцінки похибки одометрів мобільного робота, зокрема, для прогнозування поведінки похибки в часі, проте систематична та випадкова складові похибки не визначаються.

В роботі [15] ШНМ використовуються для автоматизованого виявлення систематичної похибки при калібруванні кутомірних геодезичних приладів. Показано, що застосування нейромережових алгоритмів дозволяє скоротити час та спростити цю процедуру. Проте задача попереднього визначення складових похибки вимірювання кутомірними геодезичними приладами не вирішується.

В роботі [17] приводиться модель нейромережового вимірювального перетворювача для кутових вимірювань. Аналіз та компенсація похибки відбувається на рівні елементів та підсистем перетворювача. ШНМ застосовується для виділення впливу окремих елементів системи на величину систематичної похибки в цілому. Виявлення випадкової складової похибки не проводиться.

В роботі [18] приводяться результати дослідження похибки оптичного методу контролю частоти вібрації технологічного обладнання при його роботі на основі генетичного алгоритму. Показано, що застосування інтелектуального методу дозволяє значно збільшити продуктивність вимірювань. Проте визначення складових похибки вимірювання не здійснюється.

В роботі [19] представлена структура генетичного алгоритму для підвищення точності та зменшення збоїв роботи автоматизованої технологічної системи. Аналіз похибок роботи системи не проводиться.

В роботі [20] представлено метод автоматизованої оцінки похибки геометричних вимірювань з використанням цифрової обробки зображень отриманих з відеокамери. Метод дозволяє автоматизовано обчислювати похибки на основі регресійних оцінок та похибки геометричних вимірювань на основі обробки зображень, проте не дозволяє визначати її складові.

Таким чином, проблема автоматичного визначення складових похибок вимірювання, в тому числі в режимі реального часу, для підвищення

швидкодії та точності вимірювань ще досі невирішена, що обумовлює необхідність виконуваних розробок ШНМ. Підвищення швидкодії вимірювання здійснюється на етапі обробки вимірювальної інформації за рахунок того, що в пропонованій ШНМ реалізовано метод паралельної обробки даних, за яким інформація, яка подається на ШНМ, обробляється вся одночасно, а не послідовно як в аналітично-розрахунковому методі за дисперсійним критерієм Фішера. При цьому час обробки інформації залежить як від технічних характеристик пропонованої ШНМ (від тактової частоти ПК, розрядності, кількості нейронів прихованого шару ШНМ тощо), так і від розмірності вимірювальної інформації, що обумовлюється необхідною кількістю вимірювань. Для розглядуваних в роботі прикладів, застосування пропонованої ШНМ дозволило здійснити автоматичне визначення складових похибки вимірювання за 2 с.

Підвищення точності здійснюється за рахунок виключення суб'єктивних помилок оператора на етапі аналізу вимірювальної інформації.

4.3. Загальні етапи синтезу штучних нейтронних мереж

Синтез структури пропонованих ШНМ, зокрема автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання, складається з двох етапів, які передбачають вирішення певних задач (рис. 4.2) [31, 32, 33].

Задачами *I етапу* є:

1. Визначення кількості входів (вхідних нейронів) пропонованої ШНМ;
2. Визначення кількості виходів (вихідних нейронів) пропонованої ШНМ;
3. Визначення кількості прихованих нейронів та шарів пропонованої ШНМ;
4. Вибір передатної функції.

З врахуванням того, що конкретний вид перетворення даних, виконуваний ШНМ, визначається не тільки характеристиками ШН, що складають її, а також особливостями архітектури, зокрема вибором підмножин нейронів для вводу та виводу даних, синтез пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання вимагає попереднього визначення компонент вхідного та вихідного векторів з наступним вибором кількості нейронів, їх входів та шарів пропонованої ШНМ.

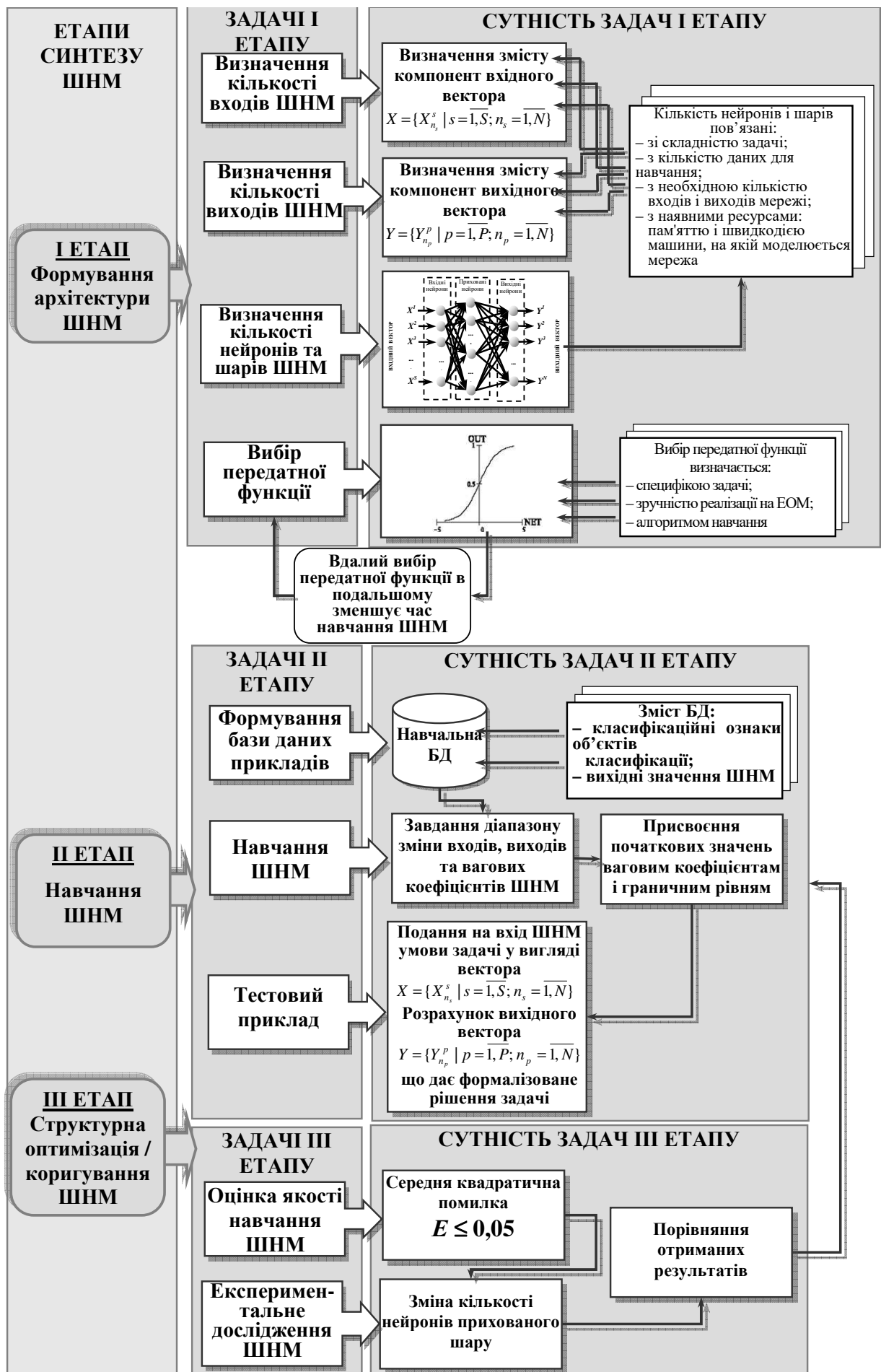


Рис. 4.2. Етапи та задачі синтезу пропонованих ШНМ [31, 32, 33]

Визначення кількості нейронів (вхідних, вихідних, прихованих) та шарів пропонованих ШНМ залежить від структури вихідних даних. Всі ШНМ реалізують принцип паралельної обробки сигналів. Це досягається об'єднанням ШН у шари та з'єднання їх певним чином. Обробка інформації в пропонованих ШНМ здійснюється пошарово, шляхом взаємодії всіх ШН. Найскладнішою операцією є визначення кількості нейронів прихованого шару, яка виконується в два етапи. На першому етапі при синтезі архітектури пропонованих ШНМ кількість нейронів прихованого шару приймається рівною кількості нейронів на вході. В подальшому (на другому етапі) при навчанні пропонованих ШНМ кількість нейронів прихованого шару коригується в залежності від успішності навчання.

Якщо пропоновані ШНМ навчаються успішно, кількість нейронів, як правило, залишають незмінною, якщо ШНМ не навчаються, то кількість нейронів збільшують [25, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35].

Для оцінки кількості нейронів прихованого шару однорідних ШНМ, в тому числі пропонованих ШНМ, можна скористатись евристичними формулами [28] для оцінки необхідної кількості синаптичних ваг L_w (для багатошарової мережі з сигмоїдною передатною функцією) (4.4) та визначення кількості нейронів прихованого шару (4.5):

$$\frac{m \cdot N}{1 + \log_2 N} \leq L_w \leq m \cdot \left(\frac{N}{m} + 1 \right) \cdot (n + m + 1) + m, \quad (4.4)$$

де L_w – кількість синаптичних ваг;

n – розмірність вхідного шару;

m – розмірність вихідного шару;

N – кількість елементів навчальної множини;

$$L = \frac{L_w}{n + m}, \quad (4.5)$$

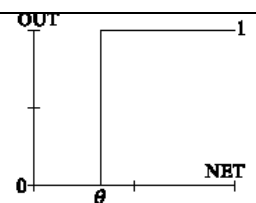
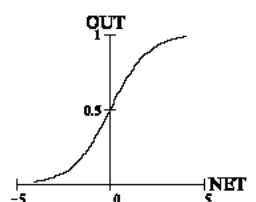
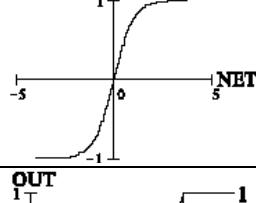
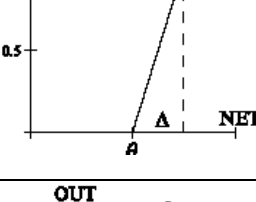
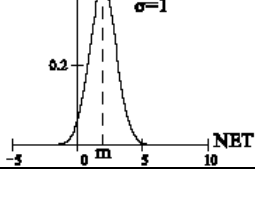
де L – кількість нейронів прихованого шару.

На практиці при вирішенні різноманітних задач фактично не зустрічаються ситуації, що вимагають застосування ШНМ з кількістю нейронів прихованого шару більше 100, звичайно вистачає декілька десятків нейронів. Більш чітка методика побудови ШНМ, зокрема, визначення розмірності прихованого шару, на сьогоднішній день відсутня [25, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35].

Вибір функції активації розроблюваних ШНМ полягає у виборі виду нелінійної функції залежності вихідного сигналу від вхідного $OUT = f(NET)$ в ШН. Вид прийнятої функції активації принципово не впливає на точність рішення задач, проте впливає на час навчання ШНМ [31, 32, 33]. В пропонуваніх ШНМ можна використовувати функції активації різних видів, основні з них приведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Основні види функцій активації

Назва функції	Формула	Область значень функції	Графік функції
Жорсткий поріг	$OUT = \begin{cases} 0, & NET < 0 \\ 1, & NET \geq 0 \end{cases}$	0; 1	
Логістична (сигмоїда, функція Фермі)	$OUT = \frac{1}{1 + e^{-NET}}$	0; 1	
Гіперболічний тангенс	$OUT = tg(NET) = \frac{e^{NET} - e^{-NET}}{e^{NET} + e^{-NET}}$	-1; 1	
Пологий поріг	$OUT = \begin{cases} 0, & NET \leq \theta \\ \frac{(NET - \theta)}{\Delta}, & \theta \leq NET < \theta + \Delta \\ 1, & NET \geq \theta + \Delta \end{cases}$	0; 1	
Гаусова крива	$OUT = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(NET-m)^2}{2\sigma^2}}$	0; 1	

Функція активації **жорсткий поріг** використовується в класичному формальному нейроні. Функція обчислюється двома – трьома машинними інструкціями, тому нейрони з такою функцією активації вимагають малих обчислювальних витрат [31, 32, 33].

Функція надмірно спрощена і не дозволяє моделювати схеми з безперервними сигналами. Відсутність першої похідної ускладнює застосування градієнтних методів для навчання таких нейронів. Мережі на класичних формальних нейронах найчастіше формуються та синтезуються, тобто їх параметри розраховуються за формулами, на відміну від навчання, коли параметри підбудовуються ітераційно [31, 32, 33].

Логістична функція активації (сигмоїда, функція Фермі) застосовується дуже часто для багатошарових перцептронів та в інших мережах з неперервними сигналами. Гладкість та неперервність функції – важливі позитивні якості. Неперервність першої похідної дозволяє навчати мережу градієнтними методами наприклад, методом зворотного поширення помилки [31, 32, 33].

Функція симетрична відносно точки ($NET=0$, $OUT=1/2$), це робить рівноправними значення $OUT = 0$ і $OUT = 1$ і є суттєвим в роботі мережі. Проте, діапазон вихідних значень від 0 до 1 є несиметричним, через це навчання значно сповільнюється [31, 32, 33].

Дана функція – стискаюча, тобто для малих значень NET коефіцієнт передачі $K=OUT/NET$ великий, для великих значень він знижується. Тому діапазон сигналів, з якими нейрон працює без насичення, є широким [31, 32, 33].

Значення похідної легко виражається через саму функцію. Швидкий розрахунок похідної прискорює навчання [31, 32, 33].

Функція активації **гіперболічний тангенс** застосовується часто для мереж з неперервними сигналами. Функція симетрична відносно точки (0,0), це перевага в порівнянні із сигмоїдою. Похідна також неперервна і виражається через саму функцію [31, 32, 33].

Функція активації **пологий поріг** розраховується легко, але має розривну першу похідну в точках $NET = \theta$, $NET = \theta + \Delta$, що ускладнює алгоритм навчання [31, 32, 33].

Функція активації **Гаусова крива** застосовується у випадках, коли реакція нейрону повинна бути максимальною для деякого визначеного значення *NET* [31, 32, 33].

Однією із найбільш розповсюджених функцій, яку доцільно використати у пропонованій ШНМ для автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання, є так звана логістична функція або сигмоїда, що описується наступним виразом [31, 32, 33]:

$$OUT = \frac{1}{1 + e^{-NET}}, \quad (4.6)$$

де *NET* – зважена сума входних сигналів, $NET = \sum_{i=1}^P w_i x_i$;

x_i – значення *i*-го входного сигналу;

w_i – вага *i*-го входного сигналу.

Одна із найважливіших властивостей логістичної функції активації – простота виразу для її похідної. Вона диференційна на всій осі абсцис, що використовується в деяких алгоритмах навчання ШНМ. Крім того, сигмоїдна функція активації має властивість підсилювати слабкі входні сигнали краще, ніж великі, і запобігає перенасиченню від великих сигналів, тому що вони відповідають областям аргументів, в яких сигмоїда має пологий нахил (див. табл. 4.2) [31, 32, 33].

Задачі **II етапу** синтезу пропонованих ШНМ виконуються для їх навчання. Процес навчання ШНМ полягає у підборі її параметрів таким чином, щоб ймовірність правильної відповіді при вирішенні поставленої задачі була найбільшою. Для цього вирішуються задачі [31, 32, 33]:

1. Формування бази даних прикладів для навчання ШНМ;
2. Навчання ШНМ як таке;
3. Тестування ШНМ за допомогою тестових прикладів.

Формування бази даних прикладів для навчання розроблюваних ШНМ передбачає синтез навчальної множини у вигляді сукупності пар векторів $\{x_i, y_i\}$, де *i* – кількість елементів у навчальній множині, $i = \overline{1, I}$;

$\{x_i\} = \{x^1, \dots, x^s\}$ – умова задачі у векторній формі; $\{y_i\} = \{y^1, \dots, y^k\}$ – відоме рішення для цієї умови. При цьому кількість пар векторів повинна бути такою, щоб під керуванням алгоритму можна було сформувати такий набір параметрів мережі, який дав би потрібне відображення перетворення сигналів вхідного вектора X у вихідний вектор Y .

Кількість пар у навчальній множині не регламентується. Якщо елементів занадто багато чи мало, мережа не навчиться і не вирішить поставлену задачу.

Під *навчанням ШНМ* розуміється процес її адаптації для досягнення мінімуму деякого оцінюючого функціонала, наприклад, помилки E при вирішенні поставленої задачі [25, 27, 28, 29, 30].

Навчання здійснюється шляхом задавання діапазону зміни значень входів, виходів, ваг синапсів та граничних рівнів з огляду на множину значень обраної функції активації, а також присвоєння їм початкових значень. Робота ШНМ полягає у перетворенні сигналів вхідного вектора X у вихідний вектор Y , причому це перетворення задається вагами синапсів мережі. На практиці сигнал, що передається від одного нейрона до другого – це число в діапазоні від 0 до 1. Причому 0 означає відсутність сигналу як такого, а 1 – максимально можливий рівень сигналу.

На першому кроці вагові коефіцієнти, тобто ваги синапсів, вибираються довільним чином з проміжку робочого діапазону функції активації. На наступних кроках здійснюється перетворення сигналів вхідного вектора X у вихідний вектор Y , причому це перетворення задається вагами мережі, які автоматично підстроюються в діапазоні значень від 0 до 1. Перевіряється значення помилки: $E = \frac{1}{2} \sum_s \sum_j (Y - Y^s)^2$, яка розраховується як сумарне квадратичне відхилення відомого значення вихідного вектора Y від отриманого Y^s . Параметри змінюються таким чином, щоб значення помилки E зменшувалось. Зміни продовжуються поки значення помилки не стане мінімальним.

Тестовий приклад. Перевіряється робота пропонуваних ШНМ поданням

на вхід типової умови задачі у вигляді вектора X та розрахунком вихідного вектору Y , що дає формалізований розв'язок задачі.

На *III етапі* синтезу ШНМ виконується її структурна оптимізація / коригування, тобто підбір розмірності прихованого шару таким чином, щоб швидкість роботи ШНМ та ймовірність правильної відповіді при вирішенні задач даного типу була найбільшою. Для цього проводиться низка експериментальних досліджень роботи однієї моделі ШНМ з різною розмірністю прихованого шару та порівняння отриманих результатів. Розмірність прихованого шару залежить від кількості синаптичних ваг, яка може бути визначена за виразами (3.6), (3.7) [28] та змінюється в інтервалі значень розрахованих за виразом (3.7) [28]. Дані, отримані в результаті експериментів, доцільно представити у табличній та графічній формі для зручності їх аналізу.

4.4. Обґрунтування вибору архітектури штучної нейронної мережі

Відомо, що ШНМ мають шарувату структуру, у якій виділена група входів та група виходів. За вхідними рецепторами ШНМ приймає інформацію і пропускає її через себе та, перетворюючи за допомогою процесорних елементів, генерує вихідні сигнали [25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35].

Синтез архітектури пропонованих ШНМ передбачає вибір способу з'єднання нейронів між собою. Ці способи, яких існує кілька десятків, визначають тип архітектури ШНМ. Вибір типу архітектури пропонованих ШНМ здійснюється у відповідності з особливостями та складністю вирішуваних задач. Для рішення задач прогнозування, класифікації та розпізнавання образів вже існують певні архітектури ШНМ [25, 27, 28, 29, 30, 31, 34, 35], які можуть успішно використовуватись після їх відповідної адаптації для розв'язку відповідних задач. Зокрема це мережі прямого поширення із „з прямою передачею сигналів”, що навчаються за алгоритмом зворотного поширення помилки – „back propagation”. ШНМ прямого поширення „з прямою передачею сигналів” на відміну від рекурентних ШНМ не мають зворотних зв'язків, тому всі сигнали передаються тільки від входу

до виходу. Такі ШНМ не мають внутрішнього стану, тобто значення виходів ШНМ залежить тільки від вхідного вектору і не змінюються з часом, якщо вхід не змінився. Відсутність зворотного зв'язку забезпечує стійкість ШНМ. Вони не входять в режим безперервної зміни стану виходу при якому ШНМ стають непридатними до використання. Основними, широко застосовуваними ШНМ є багат шаровий перцептрон, мережі Кохонена, двонаправлені мережі мережа Гросберга.

1 Багат шаровий перцептрон, перевагами якого є можливість вирішувати алгоритмічно не розв'язувані задачі, або задачі для яких алгоритмічне рішення невідоме, але для яких можливо скласти навчальний набір прикладів з відомими розв'язками. При навчанні таких ШНМ, за рахунок своєї внутрішньої будови, виявляє закономірності в зв'язках вхідних і вихідних образів “узагальнюючи” отриманий при навчанні досвід.;

2. Мережі Кохонена, перевагами яких є швидке навчання, проте неможливість побудови точних апроксимацій (точних відображень) в зв'язку з тим, що для навчання використовується метод навчання без вчителя є їх суттєвим недоліком.

3. Двонаправлені мережі, або як їх іще називають „мережі зустрічного розповсюдження Кохонена та Гросберга. Їх суттєвим недоліком є неможливість побудови точних апроксимацій.

4. Мережа Гросберга. Володіє такими перевагами, як простота структури, навчання та функціонування, проте обмежені можливості використання для розв'язку складних задач є її суттєвим недоліком.

Таким чином серед вказаних типів архітектур ШНМ виділяються мережі які називають багат шаровими перцептронами. Вони вигідно відрізняються від інших відносно простим алгоритмом навчання та реалізації за умови вищої якості результату навчання [25, 27, 28, 31, 34, 35]. Тому побудову розроблюваної ШНМ для вирішення задачі автоматичного розпізнавання складових похибок за принципом їх декомпозиції, пропонується здійснювати за структурою багат шарового перцептрону. Для обробки інформації обґрунтовується необхідна кількість нейронів у кожному шарі. При цьому загальна кількість нейронів у кожному з них може бути довільною і попередньо не зв'язана з кількістю

Принципи функціональної взаємодії пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання світлочутливою КМОП-матрицею при автоматичному визначенні складових похибок вимірювання схематично представлено на рис. 4.4.

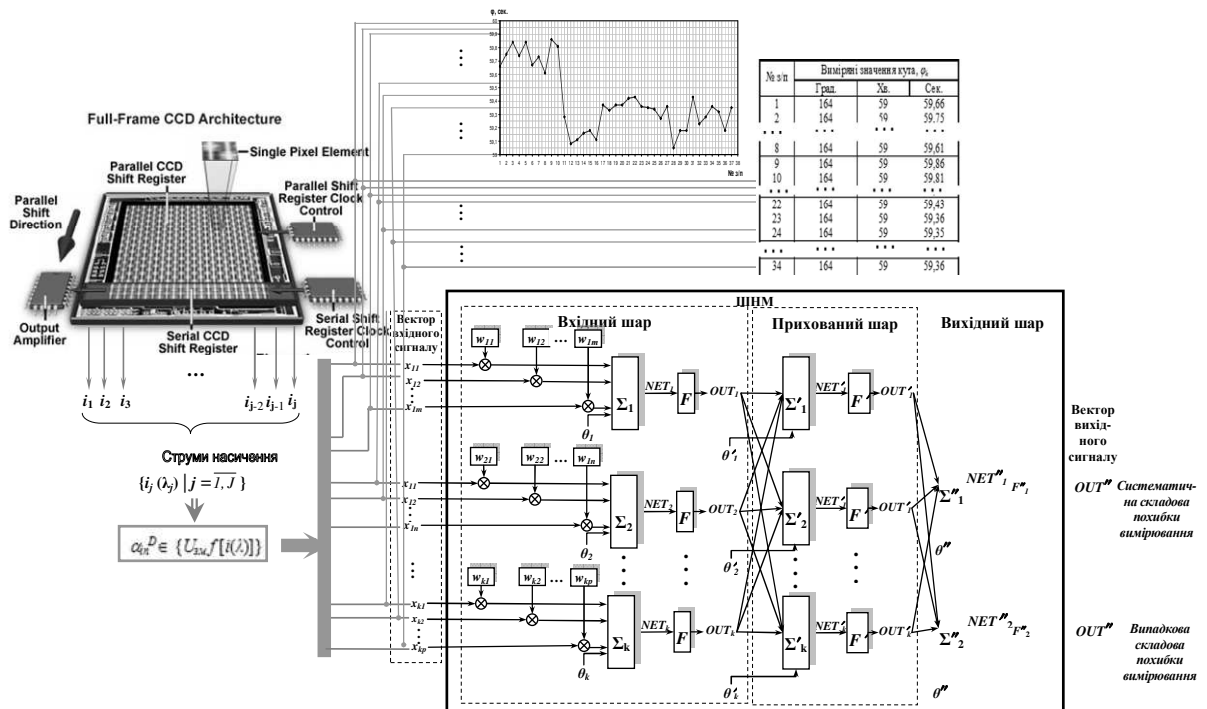


Рис. 4.4. Схематичне представлення функціональної взаємодії розробленого модуля ШНМ з КМОП-матрицею пропонованої ППСВК при автоматичному розпізнаванні складових похибок вимірювання

Структура пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання, зокрема кількість шарів та вхідних і вихідних нейронів в шарах, обумовлено умовами задачі. В якості функції активації пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання обрано сигмоїду (або функцію Фермі) (див. п. 4.3).

Перший так званий “вхідний” шар пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання утворюється вхідними нейронами і призначений для приймання вхідної інформації у вигляді вхідного вектору:

$$X = \{x_k \mid k = \overline{1; N}\}, \quad (4.7)$$

де X – вектор вхідних сигналів пропонованої ШНМ автоматичного

Наприклад, при вимірюванні кута 18-гранної призми з точністю до 0,01" та довірчою ймовірністю 0,98 необхідна і достатня кількість K вимірювань становить також 37, вхідний вектор матиме вид $X = \{x_k | k = \overline{1; 37}\}$, а його структура та компоненти приведені в табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Векторне представлення результатів вимірювання плоского кута
18-гранної призми у відповідності до вимог технології ШНМ

№ з/п	Виміряні значення кута, φ_k			Вектор- ний алфавіт	№ з/п	Виміряні значення кута, φ_k			Вектор- ний алфавіт	№ з/п	Виміряні значення кута, φ_k			Вектор- ний алфавіт
	Град.	Хв.	Сек.			Град.	Хв.	Сек.			Град.	Хв.	Сек.	
1	160	10	9,98	x_1	14	160	10	9,99	x_{14}	27	160	10	10,01	x_{27}
2	160	10	10	x_2	15	160	10	10	x_{15}	28	160	10	10	x_{28}
3	160	10	10	x_3	16	160	10	10	x_{16}	29	160	10	10,03	x_{29}
4	160	10	9,99	x_4	17	160	10	9,97	x_{17}	30	160	10	10	x_{30}
5	160	10	10	x_5	18	160	10	10,01	x_{18}	31	160	10	10	x_{31}
6	160	10	10	x_6	19	160	10	10,01	x_{19}	32	160	10	9,99	x_{32}
7	160	10	9,99	x_7	20	160	10	9,99	x_{20}	33	160	10	9,98	x_{33}
8	160	10	9,99	x_8	21	160	10	10,01	x_{21}	34	160	10	9,99	x_{34}
9	160	10	10	x_9	22	160	10	9,99	x_{22}	35	160	10	9,99	x_{35}
10	160	10	9,99	x_{10}	23	160	10	10,01	x_{23}	36	160	10	10	x_{36}
11	160	10	10	x_{11}	24	160	10	10	x_{24}	37	160	10	10	x_{37}
12	160	10	10,01	x_{12}	25	160	10	10	x_{25}	—	—	—	—	
13	160	10	9,99	x_{13}	26	160	10	9,99	x_{26}	—	—	—	—	
Загальна структура вхідного вектору $X = \{x_k k = \overline{1; 37}\}$: $X = \{x_1; x_2; x_3; x_4; x_5; x_6; x_7; x_8; x_9; x_{10}; x_{11}; x_{12}; x_{13}; x_{14}; x_{15}; x_{16}; x_{17}; x_{18}; x_{19}; x_{20}; x_{21}; x_{22};$ $x_{23}; x_{24}; x_{25}; x_{26}; x_{27}; x_{28}; x_{29}; x_{30}; x_{31}; x_{32}; x_{33}; x_{34}; x_{35}; x_{36}; x_{37}\}$														

В табл. 4.5 приведені структура та компоненти вхідного вектора при вимірюванні величини плоского кута 36-гранної призми з точністю до 0,01" та довірчою ймовірністю 0,98. Необхідна і достатня кількість вимірювань в цьому випадку становить 37.

У вхідному шарі не здійснюються обчислювальні процедури, і інформація передається з входу на вихід нейронів шляхом зміни їх активації.

Таблиця 4.5

Векторне представлення результатів вимірювання плоского кута
36-гранної призми у відповідності до вимог технології ШНМ

№ з/п	Виміряні значення кута, φ_k			Вектор- ний алфавіт	№ з/п	Виміряні значення кута, φ_k			Вектор- ний алфавіт	№ з/п	Виміряні значення кута, φ_k			Вектор- ний алфавіт
	Град.	Хв.	Сек.			Град.	Хв.	Сек.			Град.	Хв.	Сек.	
1	170	69	69,8	x_1	14	170	69	69,80	x_{14}	27	170	69	69,97	x_{27}
2	170	69	69,79	x_2	15	170	69	69,96	x_{15}	28	170	69	69,97	x_{28}
3	170	69	69,96	x_3	16	170	69	69,91	x_{16}	29	170	69	69,97	x_{29}
4	170	69	69,91	x_4	17	170	69	70,15	x_{17}	30	170	69	69,97	x_{30}
5	170	69	70,15	x_5	18	170	69	69,85	x_{18}	31	170	69	69,97	x_{31}
6	170	69	69,85	x_6	19	170	69	69,79	x_{19}	32	170	69	69,97	x_{32}
7	170	69	69,79	x_7	20	170	69	70,04	x_{20}	33	170	69	69,97	x_{33}
8	170	69	70,04	x_8	21	170	69	69,76	x_{21}	34	170	69	69,97	x_{34}
9	170	69	69,76	x_9	22	170	69	70,32	x_{22}	35	170	69	69,97	x_{35}
10	170	69	70,32	x_{10}	23	170	69	70,03	x_{23}	36	170	69	69,97	x_{36}
11	170	69	70,15	x_{11}	24	170	69	70,15	x_{24}	37	170	69	69,97	x_{37}
12	170	69	70,22	x_{12}	25	170	69	70,22	x_{25}	—	—	—	—	
13	170	69	69,94	x_{13}	26	170	69	69,94	x_{26}	—	—	—	—	
Загальна структура вхідного вектору $X = \{x_k \mid k = \overline{1; 37}\}$: $X = \{ x_1 ; x_2 ; x_3 ; x_4 ; x_5 ; x_6 ; x_7 ; x_8 ; x_9 ; x_{10} ; x_{11} ; x_{12} ; x_{13} ; x_{14} ; x_{15} ; x_{16} ; x_{17} ; x_{18} ; x_{19} ; x_{20} ; x_{21} ; x_{22} ;$ $x_{23} ; x_{24} ; x_{25} ; x_{26} ; x_{27} ; x_{28} ; x_{29} ; x_{30} ; x_{31} ; x_{32} ; x_{33} ; x_{34} ; x_{35} ; x_{36} ; x_{37} \}$														

На виході запропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання формується вихідний вектор Y значень наявності систематичної та випадкової складових похибок вимірювання. Рішення про наявність тієї чи іншої складової похибки вимірювання приймається так званим інтерпретатором відповіді мережі. В даному випадку застосовується інтерпретатор „переможець отримує все”, в якому кількість вихідних сигналів відповідає кількості варіантів відповіді, а номер відповіді відповідає номеру нейрона, що видав максимальний сигнал на виході.

Тобто при визначенні складових похибки вимірювання може бути два варіанта відповіді: “у результатах вимірювання наявна систематична складова похибки вимірювання” та “у результатах вимірювання наявна випадкова складова похибки вимірювання”. Відповідно структура вихідного вектору може бути представлена виразом (4.8) та табл. 4.6.

$$Y = \{y_m \mid m = \overline{1; 2}\} = \{y_1; y_2\} \quad (4.8)$$

де Y – вектор вихідних сигналів пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання;

m – кількість складових похибок вимірювання, що аналізуються;

y_1 – вихідний сигнал пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання, що відповідає наявності систематичної складової похибки вимірювання у результатах спостереження при багаторазових вимірюваннях;

y_2 – вихідний сигнал пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання, що відповідає наявності випадкової складової похибки вимірювання у результатах спостереження при багаторазових вимірюваннях.

Таблиця 4.6

Характеристика вихідного вектору пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання

Складова похибки вимірювання	Інформація про наявність складової похибки у результатах вимірювання	Векторний алфавіт	
		максимальне значення сигналу	компоненти вихідного вектору
Систематична	наявна	1	y_1
	відсутня	0	
Випадкова	наявна	1	y_2
	відсутня	0	
Загальна структура вихідного вектору $Y = \{y_m \mid m = \overline{1; 2}\}$: $Y = \{y_1; y_2\}$			

Структура вихідного вектору обумовлює розмірність вихідного шару ШНМ для автоматизованого визначення складових похибок вимірювання.

У “прихованому” шарі здійснюється проміжна обробка інформації таким чином, що на вихідний шар нейронів подаються лінійно-розділені множини. Розмірність прихованого шару визначалась емпірично в два етапи та варіювалась під час експериментальних досліджень пропонованої ШНМ. Зокрема на першому етапі синтезу пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання кількість нейронів прихованого шару була прийнята рівною кількості нейронів на вході. На другому етапі, при навчанні пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання кількість нейронів

прихованого шару коригувалась в залежності від успішності її навчання. При цьому граничні значення кількості нейронів прихованого шару розраховувались за відомими евристичними формулами (4.4) та (4.5).

4.5.2. Формування навчальної множини для навчання штучної нейронної мережі автоматичного визначення складових похибок вимірювання

Навчання пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання передбачає створення навчальної множини, що утворює навчальну базу даних (БД). В зв'язку з тим, що якість навчання пропонованої ШНМ залежить від кількості прикладів в навчальній множині та повноти опису ними поставленої задачі, то прийнято вважати, що для повноцінного навчання ШНМ необхідно декілька десятків прикладів [28]. Тому, для навчання пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання, було сформовано навчальну множину із 60 прикладів, які являють собою 60 результатів атестації багатогранних призм, наприклад, ППБ-6, ППБ-8, ППБ-10, ППБ-12, ППБ-18, ППБ-24 які використовуються для регулювання і настройки кутомірних приладів і безпосереднього вимірювання кутів промислових виробів ГОСТ 2875-88 (табл. 4.7). Кожний приклад навчальної множини $\langle X, Y \rangle$, відповідно до вимог технології ШНМ являє собою вектор вхідних сигналів мережі $X = (x_1, x_2, \dots, x_s)$, що є множиною результатів багаторазових вимірювань плоского кута відповідної багатогранної призми при її атестації (табл. 4.8) та вектор вихідних сигналів $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$, що являє собою результат визначення наявності відповідної складової (систематичної або випадкової) похибки вимірювання у відповідній множині результатів багаторазових вимірювань величини плоского кута відповідної багатогранної призми (табл. 4.9).

Джерелами інформації табл. 4.7 – табл. 4.9 є технічна документація, дані про атестацію багатогранних призм, отримані із інформаційного джерела [39], результати комп'ютерного моделювання та розрахунки дисперсійного критерію Фішера, що дозволяє визначити яка складова похибки вимірювання міститься у результатах вимірювання.

Таблиця 4.7

Таблиця навчальної бази даних для навчання пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання “Робочі та еталонні засоби для регулювання і настройки кутомірних приладів і безпосереднього вимірювання кутів промислових виробів”

Кодове позначення у БД	Назва	Призначення	Технічні характеристики			Величина кута φ°
Призми правильні багатогранні ППБ ГОСТ 2875-88						
ППБ-4	4-гранна [37]	В якості робочих засобів для регулювання і настройки кутомірних приладів і безпосереднього вимірювання кутів промислових виробів; В якості еталонних мір для передачі розміру одиниці плоского кута робочим засобам вимірювання кутів.	Показник	Клас точності		90
				0	1	
			Зовнішній діаметр, мм	Ø 80		
			Допуск площинності вимірювальних поверхонь, мкм, не більше	0,05	0,07	
			Границі допустимих відхилень від номінальних значень робочого кута, сек, не більше	±5	±8	
			Допуски неперпендикулярності вимірювальних поверхонь до базової поверхні призми, сек, не більше	±10	±20	
			Паралельність утворюючих площин призми, мкм, не більше	1,0		
	Шорсткість робочих площин граней Ra, мкм	0,016				
ППБ-6	6-гранная [37]	В якості робочих засобів для регулювання і настройки кутомірних приладів і безпосереднього вимірювання кутів промислових виробів; В якості еталонних мір для передачі розміру одиниці плоского кута робочим засобам вимірювання кутів.	Показник	Клас точності		120
				0	1	
			Зовнішній діаметр, мм	Ø 80		
			Допуск площинності вимірювальних поверхонь, мкм, не більше	0,05	0,07	
			Границі допустимих відхилень від номінальних значень робочого кута, сек, не більше	±5	±8	
			Допуски неперпендикулярності вимірювальних поверхонь до базової поверхні призми, сек, не більше	±10	±20	
			Паралельність утворюючих площин призми, мкм, не більше	1,0		
	Шорсткість робочих площин граней Ra, мкм	0,016				

Продовження табл. 4.7

Кодове позначення у БД	Назва	Призначення	Технічні характеристики			Величина кута φ°
Призми правильні багатогранні ППБ ГОСТ 2875-88						
ППБ-8	8-гранна [38] 	<p>В якості робочих засобів для регулювання і настройки кутомірних приладів і безпосереднього вимірювання кутів промислових виробів;</p> <p>В якості еталонних мір для передачі розміру одиниці плоского кута робочим засобам вимірювання кутів.</p>	Показник	Клас точності		135
				0	1	
			Зовнішній діаметр, мм	Ø 90		
			Допуск площинності вимірювальних поверхонь, мкм, не більше	0,05	0,07	
			Границі допустимих відхилень від номінальних значень робочого кута, кут. сек., не більше	±5	±8	
			Допуски неперпендикулярності вимірювальних поверхонь до базової поверхні призми, кут. сек., не більше	±10	±20	
			Паралельність утворюючих площин призми, мкм, не більше	1,0		
	Шорсткість робочих площин граней Ra, мкм		0,016			
ППБ-10	10-гранна [37]	<p>В якості робочих засобів для регулювання і настройки кутомірних приладів і безпосереднього вимірювання кутів промислових виробів;</p> <p>В якості еталонних мір для передачі розміру одиниці плоского кута робочим засобам вимірювання кутів.</p>	Показник	Клас точності		144
				0	1	
			Зовнішній діаметр, мм	Ø 100		
			Допуск площинності вимірювальних поверхонь, мкм, не більше	0,05	0,07	
			Границі допустимих відхилень від номінальних значень робочого кута, кут. сек., не більше	±5	±8	
			Допуски неперпендикулярності вимірювальних поверхонь до базової поверхні призми, кут. сек., не більше	±10	±20	
			Паралельність утворюючих площин призми, мкм, не більше	1,0		
	Шорсткість робочих площин граней Ra, мкм		0,016			

Продовження табл. 4.7

Кодове позначення у БД	Назва	Призначення	Технічні характеристики			Величина кута φ°
Призми правильні багатогранні ППБ ГОСТ 2875-88						
ППБ-12	12-гранна [38] 	<p>В якості робочих засобів для регулювання і настройки кутомірних приладів і безпосереднього вимірювання кутів промислових виробів;</p> <p>В якості еталонних мір для передачі розміру одиниці плоского кута робочим засобам вимірювання кутів.</p>	Показник	Клас точності		150
				0	1	
			Зовнішній діаметр, мм	Ø 100		
			Допуск площинності вимірювальних поверхонь, мкм, не більше	0,05	0,07	
			Границі допустимих відхилень від номінальних значень робочого кута, сек., не більше	±5	±8	
			Допуски неперпендикулярності вимірювальних поверхонь до базової поверхні призми, кут. сек., не більше	±10	±20	
			Паралельність утворюючих площин призми, мкм, не більше	1,0		
Шорсткість робочих площин граней Ra, мкм	0,016					
ППБ-18	18-гранна [38] 	<p>В якості робочих засобів для регулювання і настройки кутомірних приладів і безпосереднього вимірювання кутів промислових виробів;</p> <p>В якості еталонних мір для передачі розміру одиниці плоского кута робочим засобам вимірювання кутів.</p>	Показник	Клас точності		160
				0	1	
			Зовнішній діаметр, мм	Ø 120		
			Допуск площинності вимірювальних поверхонь, мкм, не більше	0,05	0,07	
			Границі допустимих відхилень від номінальних значень робочого кута, сек, не більше	±5	±8	
			Допуски неперпендикулярності вимірювальних поверхонь до базової поверхні призми, кут. сек., не більше	±10	±20	
			Паралельність утворюючих площин призми, мкм, не більше	1,0		
Шорсткість робочих площин граней Ra, мкм	0,016					

Продовження табл. 4.7

Кодове позначення у БД	Назва	Призначення	Технічні характеристики			Величина кута φ°
Призми правильні багатогранні ППБ ГОСТ 2875-88						
ППБ-24	24-гранна [38] 	<p>В якості робочих засобів для регулювання і настройки кутомірних приладів і безпосереднього вимірювання кутів промислових виробів;</p> <p>В якості еталонних мір для передачі розміру одиниці плоского кута робочим засобам вимірювання кутів.</p>	Показник	Клас точності		165
				0	1	
			Зовнішній діаметр, мм	Ø 138		
			Допуск площинності вимірювальних поверхонь, мкм, не більше	0,05	0,07	
			Границі допустимих відхилень від номінальних значень робочого кута, кут. сек., не більше	±5	±8	
			Допуски неперпендикулярності вимірювальних поверхонь до базової поверхні призми, кут. сек., не більше	±10	±20	
			Паралельність утворюючих площин призми, мкм, не більше	1,0		
Шорсткість робочих площин граней Ra, мкм	0,016					
ППБ-36	36-гранна [38] 	<p>В якості робочих засобів для регулювання і настройки кутомірних приладів і безпосереднього вимірювання кутів промислових виробів;</p> <p>В якості еталонних мір для передачі розміру одиниці плоского кута робочим засобам вимірювання кутів.</p>	Показник	Клас точності		170
				0	1	
			Зовнішній діаметр, мм	Ø 180		
			Допуск площинності вимірювальних поверхонь, мкм, не більше	0,05	0,07	
			Границі допустимих відхилень від номінальних значень робочого кута, сек, не більше	±5	±8	
			Допуски неперпендикулярності вимірювальних поверхонь до базової поверхні призми, кут. сек., не більше	±10	±20	
			Паралельність утворюючих площин призми, мкм, не більше	1,0		
Шорсткість робочих площин граней Ra, мкм	0,016					

Закінчення табл. 4.7

Кодове позначення у БД	Назва	Призначення	Технічні характеристики			Величина кута φ°
Призми правильні багатогранні ППБ ГОСТ 2875-88						
ППБ-40	40-гранна [39]	В якості робочих засобів для регулювання і настройки кутомірних приладів і безпосереднього вимірювання кутів промислових виробів; В якості еталонних мір для передачі розміру одиниці плоского кута робочим засобам вимірювання кутів.	Показник	Клас точності		171
				0	1	
			Зовнішній діаметр, мм	Ø 180		
			Допуск площинності вимірювальних поверхонь, мкм, не більше	0,05	0,07	
			Границі допустимих відхилень від номінальних значень робочого кута, сек, не більше	±5	±8	
			Допуски неперпендикулярності вимірювальних поверхонь до базової поверхні призми, кут. сек., не більше	±10	±20	
			Паралельність утворюючих площин призми, мкм, не більше	1,0		
Шорсткість робочих площин граней Ra, мкм			0,016			
Призми неправильні багатогранні ПНБ						
ПНБ-5	5-гранна [37]	В якості робочих засобів для регулювання і настройки кутомірних приладів і безпосереднього вимірювання кутів промислових виробів; В якості еталонних мір для передачі розміру одиниці плоского кута робочим засобам вимірювання кутів.	Показник	Клас точності		108
				0	1	
			Зовнішній діаметр, мм	Ø 80		
			Допуск площинності вимірювальних поверхонь, мкм, не більше	0,05	0,07	
			Границі допустимих відхилень від номінальних значень робочого кута, кут. сек., не більше	±5	±8	
			Допуски неперпендикулярності вимірювальних поверхонь до базової поверхні призми, кут. сек., не більше	±10	±20	
			Паралельність утворюючих площин призми, мкм, не більше	1,0		
Шорсткість робочих площин граней Ra, мкм			0,016			

Таблиця 4.8

Вхідний вектор навчальної множини пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання за результатами вимірювання плоских кутів робочими та еталонними засобами для регулювання і настройки кутомірних приладів і безпосереднього вимірювання кутів промислових виробів ГОСТ 2875-88

Кодове позначення прикладу у БД	Векторний алфавіт вхідного вектору $X = \{x_k \mid k = \overline{1; 40}\}$ виміряних значень кута, φ_k , сек.																			
	Від x_1 до x_{20}																			
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}	x_{20}
ППБ-24 / 1	59,66	59,75	59,84	59,74	59,84	59,67	59,73	59,61	59,86	59,81	59,28	59,08	59,11	59,16	59,18	59,11	59,37	59,33	59,37	59,37
ППБ-24 / 2	60,0003	60,0006	60,0009	60,0012	60,0015	60,0018	60,0021	60,0024	60,0027	60,003	60,0033	60,0036	60,0039	60,0042	60,0045	60,0048	60,0051	60,0054	60,0057	60,006
ППБ-24 / 3	59,18	59,19	59,05	59,08	59,04	59,14	58,77	58,66	58,96	59,17	59,08	59,19	58,66	59,04	58,65	58,88	58,96	58,63	58,95	59,38
ППБ-24 / 4	59,0003	59,0006	59,0009	59,0012	59,0015	59,0018	59,0021	59,0024	59,0027	59,003	59,0033	59,0036	59,0039	59,0042	59,0045	59,0048	59,0051	59,0054	59,0057	59,006
ППБ-24 / 5	59,09	59	58,7	58,7	58,94	58,65	58,89	59,17	59,35	58,89	58,76	58,75	58,85	59,05	59,05	58,66	59,01	59,15	58,92	58,86
ППБ-24 / 6	59,1	58,94	58,99	58,86	58,94	58,91	59,28	59,35	58,8	59,24	58,96	59,24	59,18	58,93	59,41	58,42	59,04	58,96	58,63	59,12
ППБ-24 / 7	59,17	59,26	59,17	58,6	58,87	59,16	58,73	59,04	58,96	59,04	59,15	59,23	58,76	59,07	58,69	58,83	59,3	58,81	59,3	59,05
ППБ-24 / 8	58,91	59,21	58,98	59,16	58,85	58,98	59,1	59	58,84	58,77	58,71	59,2	58,72	59,32	58,85	58,87	58,89	59,09	58,98	59,19
ППБ-24 / 9	58,5003	58,5006	58,5009	58,5012	58,5015	58,5018	58,5021	58,5024	58,5027	58,503	58,5033	58,5036	58,5039	58,5042	58,5045	58,5048	58,5051	58,5054	58,5057	58,506
ППБ-24 / 10	57,7003	57,7006	57,7009	57,7012	57,7015	57,7018	57,7021	57,7024	57,7027	57,703	57,7033	57,7036	57,7039	57,7042	57,7045	57,7048	57,7051	57,7054	57,7057	57,706
	Від x_{21} до x_{40}																			
	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}	x_{26}	x_{27}	x_{28}	x_{29}	x_{30}	x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{34}	x_{35}	x_{36}	x_{37}	x_{38}	x_{39}	x_{40}
ППБ-24/ 1	59,42	59,43	59,36	59,35	59,34	59,27	59,36	59,05	59,18	59,18	59,43	59,23	59,28	59,36	59,32	59,18	59,35	59,03	58,91	59,12
ППБ-24/ 2	60,0063	60,0066	60,0069	60,0072	60,0075	60,0078	60,0081	60,0084	60,0087	60,009	60,0093	60,0096	60,0099	60,0102	60,0105	60,0108	60,0111	60,0114	60,0117	60,012
ППБ-24/ 3	59,18	58,93	58,8	59,14	59,15	58,71	59,43	59,14	58,78	59,29	59,2	58,95	58,45	59,4	59,46	58,94	59,13	59,02	59,32	59,08
ППБ-24/ 4	59,0063	59,0066	59,0069	59,0072	59,0075	59,0078	59,0081	59,0084	59,0087	59,009	59,0093	59,0096	59,0099	59,0102	59,0105	59,0108	59,0111	59,0114	59,0117	59,012
ППБ-24/ 5	59,11	58,84	59,01	59,21	58,84	59,21	59,16	59,03	59,38	58,75	58,92	59,03	58,97	59,37	59,28	59,05	59,07	59,32	59,16	59,33
ППБ-24/ 6	58,71	58,82	58,95	59,2	58,91	58,79	58,91	59,03	59,14	58,85	58,97	59,01	58,86	59,13	59,16	59,12	58,57	58,96	59,19	59,06
ППБ-24/ 7	58,86	58,74	58,8	59,29	58,84	58,8	58,89	59,16	59,15	59,21	59,08	59,04	59,08	58,99	58,93	59	58,93	58,77	58,9	59
ППБ-24/ 8	59,36	59,11	59,11	58,88	59,23	58,76	59,04	58,58	58,97	59,07	58,9	58,72	59,15	59,06	59,21	58,81	59,05	58,74	59,14	59,08
ППБ-24/ 9	58,5063	58,5066	58,5069	58,5072	58,5075	58,5078	58,5081	58,5084	58,5087	58,509	58,5093	58,5096	58,5099	58,5102	58,5105	58,5108	58,5111	58,5114	58,5117	58,512
ППБ-24/ 10	57,7063	57,7066	57,7069	57,7072	57,7075	57,7078	57,7081	57,7084	57,7087	57,709	57,7093	57,7096	57,7099	57,7102	57,7105	57,7108	57,7111	57,7114	57,7117	57,712

Продовження табл. 4.8

Кодове позначення прикладу у БД	Векторний алфавіт вхідного вектору $X = \{x_k \mid k = \overline{1; 40}\}$ вимірних значень кута, φ_k , сек.																			
	Від x_1 до x_{20}																			
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}	x_{20}
ППБ-8 / 11	15,13	15,28	15,18	15,13	14,77	14,86	15,89	15,76	14,76	15,3	14,18	14,73	15,19	15,11	15,12	14,61	14,89	14,34	14,96	15,55
ППБ-8 / 12	15,04	13,71	14,71	15,34	15,63	15,81	14,74	14,77	15,29	14,97	15,46	14,43	14,24	15,13	15,28	14,92	16,41	15,81	14,47	16,17
ППБ-8 / 13	14,95	15,14	15,29	14,88	15,47	15,88	14,79	15,01	15,2	14,02	15,19	15,1	15,54	15,7	14,67	14,93	15,03	14,31	14,66	14,45
ППБ-8 / 14	15,53	15,55	15,29	15,81	14,14	14,92	15,21	15,79	14,42	14,64	14,79	14,01	15,1	15,44	15,19	14,81	15,32	14,71	14,97	14,33
ППБ-8 / 15	14,49	15,41	14,42	14,38	15,03	15,54	15,04	15,28	14,86	15,44	14,78	15,01	15,72	15,32	15,52	14,59	15,06	14,88	14,85	15,31
ППБ-8 / 16	15,0003	15,0006	15,0009	15,0012	15,0015	15,0018	15,0021	15,0024	15,0027	15,003	15,0033	15,0036	15,0039	15,0042	15,0045	15,0048	15,0051	15,0054	15,0057	15,006
ППБ-8 / 17	14,8003	14,8006	14,8009	14,8012	14,8015	14,8018	14,8021	14,8024	14,8027	14,803	14,8033	14,8036	14,8039	14,8042	14,8045	14,8048	14,8051	14,8054	14,8057	14,806
ППБ-8 / 18	14,5003	14,5006	14,5009	14,5012	14,5015	14,5018	14,5021	14,5024	14,5027	14,503	14,5033	14,5036	14,5039	14,5042	14,5045	14,5048	14,5051	14,5054	14,5057	14,506
ППБ-8 / 19	14,2003	14,2006	14,2009	14,2012	14,2015	14,2018	14,2021	14,2024	14,2027	14,203	14,2033	14,2036	14,2039	14,2042	14,2045	14,2048	14,2051	14,2054	14,2057	14,206
ППБ-8 / 20	14,7003	14,7006	14,7009	14,7012	14,7015	14,7018	14,7021	14,7024	14,7027	14,703	14,7033	14,7036	14,7039	14,7042	14,7045	14,7048	14,7051	14,7054	14,7057	14,706
	Від x_{21} до x_{40}																			
	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}	x_{26}	x_{27}	x_{28}	x_{29}	x_{30}	x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{34}	x_{35}	x_{36}	x_{37}	x_{38}	x_{39}	x_{40}
ППБ-8/ 11	14,73	14,41	15,61	15,15	15,02	14,98	14,86	14,82	15	14,42	13,41	16,17	14,06	15,37	15,4	16,24	14,45	14,87	14,58	15
ППБ-8/ 12	15,75	15,43	14,49	15,03	15,31	15,87	15,29	15,09	15,48	15,01	15,87	14,26	14,31	14,75	14,89	15,09	15,4	14,54	13,92	15
ППБ-8/ 13	14,63	14,96	14,62	15,68	14,85	15,17	15,24	14,76	15,58	15,53	14,71	14,89	15,69	15,76	14,19	14,71	14,4	15,5	14,34	14,46
ППБ-8/ 14	14,45	14,78	14,7	15,31	14,67	14,57	15,57	15,5	15,57	15,22	15,81	15,19	15,56	15,62	14,75	14,96	15,19	14,33	14,87	14,61
ППБ-8/ 15	14,94	15,19	15,04	14,87	15,57	15,47	15,05	13,96	14,67	14,9	14,41	15,02	14,46	14,89	15,6	15,4	14,38	15,27	15,47	14,84
ППБ-8/ 16	15,0063	15,0066	15,0069	15,0072	15,0075	15,0078	15,0081	15,0084	15,0087	15,009	15,0093	15,0096	15,0099	15,0102	15,0105	15,0108	15,0111	15,0114	15,0117	15,012
ППБ-8/ 17	14,8063	14,8066	14,8069	14,8072	14,8075	14,8078	14,8081	14,8084	14,8087	14,809	14,8093	14,8096	14,8099	14,8102	14,8105	14,8108	14,8111	14,8114	14,8117	14,812
ППБ-8/ 18	14,5063	14,5066	14,5069	14,5072	14,5075	14,5078	14,5081	14,5084	14,5087	14,509	14,5093	14,5096	14,5099	14,5102	14,5105	14,5108	14,5111	14,5114	14,5117	14,512
ППБ-8/ 19	14,2063	14,2066	14,2069	14,2072	14,2075	14,2078	14,2081	14,2084	14,2087	14,209	14,2093	14,2096	14,2099	14,2102	14,2105	14,2108	14,2111	14,2114	14,2117	14,212
ППБ-8/ 20	14,7063	14,7066	14,7069	14,7072	14,7075	14,7078	14,7081	14,7084	14,7087	14,709	14,7093	14,7096	14,7099	14,7102	14,7105	14,7108	14,7111	14,7114	14,7117	14,712

Продовження табл. 4.8

Кодове позначення прикладу у БД	Векторний алфавіт вхідного вектору $X = \{x_k \mid k = \overline{1; 40}\}$ виміряних значень кута, φ_k , сек.																			
	від x_1 до x_{20}																			
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}	x_{20}
ППБ-6 / 21	4,99	5	4,99	5,02	5	5	5,01	5,02	5,02	4,99	5	4,99	5	5,02	5,01	4,99	4,99	5	5,01	5,01
ППБ-6 / 22	5,0003	5,0006	5,0009	5,0012	5,0015	5,0018	5,0021	5,0024	5,0027	5,003	5,0033	5,0036	5,0039	5,0042	5,0045	5,0048	5,0051	5,0054	5,0057	5,006
ППБ-6 / 23	5	5,01	5,01	5,02	5	5,01	5,01	5	4,99	4,99	5	5	5,01	5	5	4,99	5,01	4,98	4,99	5,01
ППБ-6 / 24	5,5003	5,5006	5,5009	5,5012	5,5015	5,5018	5,5021	5,5024	5,5027	5,503	5,5033	5,5036	5,5039	5,5042	5,5045	5,5048	5,5051	5,5054	5,5057	5,506
ППБ-6 / 25	5	5	5,01	4,99	4,99	5	5	5	4,98	5	4,98	5,03	5	5,01	5	5	4,98	5,01	5,01	5,02
ППБ-6 / 26	6,0003	6,0006	6,0009	6,0012	6,0015	6,0018	6,0021	6,0024	6,0027	6,003	6,0033	6,0036	6,0039	6,0042	6,0045	6,0048	6,0051	6,0054	6,0057	6,006
ППБ-6 / 27	5,9003	5,9006	5,9009	5,9012	5,9015	5,9018	5,9021	5,9024	5,9027	5,903	5,9033	5,9036	5,9039	5,9042	5,9045	5,9048	5,9051	5,9054	5,9057	5,906
ППБ-6 / 28	4,99	5	5,01	4,99	5	5	5	4,99	4,99	4,98	5,01	4,99	4,99	5	5,02	5	5	5,03	5,01	5
ППБ-6 / 29	5,01	4,99	5	5,01	5,01	4,99	4,99	4,99	4,98	5	4,99	5	5	5,01	4,98	5,01	5,01	5,01	4,99	4,98
ППБ-6 / 30	5,7503	5,7506	5,7509	5,7512	5,7515	5,7518	5,7521	5,7524	5,7527	5,753	5,7533	5,7536	5,7539	5,7542	5,7545	5,7548	5,7551	5,7554	5,7557	5,756
	від x_{21} до x_{40}																			
	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}	x_{26}	x_{27}	x_{28}	x_{29}	x_{30}	x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{34}	x_{35}	x_{36}	x_{37}	x_{38}	x_{39}	x_{40}
ППБ-6/ 21	5,02	5,01	4,98	5	5	5,02	5	4,99	5,01	5,01	5,01	5	4,99	4,98	5	5	5,02	5,01	4,99	5,01
ППБ-6/ 22	5,0063	5,0066	5,0069	5,0072	5,0075	5,0078	5,0081	5,0084	5,0087	5,009	5,0093	5,0096	5,0099	5,0102	5,0105	5,0108	5,0111	5,0114	5,0117	5,012
ППБ-6/ 23	5	5	4,99	5,01	4,99	5	5,01	5	5	5	5	5	4,99	4,99	5	5	5,01	5	4,99	5,02
ППБ-6/ 24	5,5063	5,5066	5,5069	5,5072	5,5075	5,5078	5,5081	5,5084	5,5087	5,509	5,5093	5,5096	5,5099	5,5102	5,5105	5,5108	5,5111	5,5114	5,5117	5,512
ППБ-6/ 25	5,03	5	4,98	5,01	4,99	5,01	4,99	5	5,01	5,02	5	5	5,02	5,01	4,99	5	4,99	5	5	5
ППБ-6/ 26	6,0063	6,0066	6,0069	6,0072	6,0075	6,0078	6,0081	6,0084	6,0087	6,009	6,0093	6,0096	6,0099	6,0102	6,0105	6,0108	6,0111	6,0114	6,0117	6,012
ППБ-6/ 27	5,9063	5,9066	5,9069	5,9072	5,9075	5,9078	5,9081	5,9084	5,9087	5,909	5,9093	5,9096	5,9099	5,9102	5,9105	5,9108	5,9111	5,9114	5,9117	5,912
ППБ-6/ 28	4,99	5	4,99	5	4,99	4,99	5	4,99	5,01	5	4,99	4,99	5,02	5,01	4,99	5	5,01	5,01	5,01	5,01
ППБ-6/ 29	5,01	5,01	5,01	5	5,02	5,01	5	4,98	5	4,99	5	5	4,98	4,99	4,98	5	4,99	5,01	4,99	4,99
ППБ-6/ 30	5,7563	5,7566	5,7569	5,7572	5,7575	5,7578	5,7581	5,7584	5,7587	5,759	5,7593	5,7596	5,7599	5,7602	5,7605	5,7608	5,7611	5,7614	5,7617	5,762

Продовження табл. 4.8

Кодове позначення прикладу у БД	Векторний алфавіт вхідного вектору $X = \{x_k \mid k = \overline{1; 40}\}$ вимірюваних значень кута, φ_k , сек.																			
	Від x_1 до x_{20}																			
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}	x_{20}
ППБ-18 /31	9,98	10	10	9,99	10	10	9,99	9,99	10	9,99	10	10,01	9,99	9,99	9,99	10	10	9,97	10,01	10,01
ППБ-18 /32	10,02	10	9,97	9,99	10	10	10	10	9,98	10,01	9,98	10,02	10	10	10	9,99	9,99	9,99	10	9,99
ППБ-18 /33	9,99	10	10,01	9,97	10,02	9,98	9,98	9,99	9,99	10,01	10	9,98	9,99	10,01	10,01	10,01	10	9,99	10	9,99
ППБ-18 /34	10,8503	10,8506	10,8509	10,8512	10,8515	10,8518	10,8521	10,8524	10,8527	10,853	10,8533	10,8536	10,8539	10,8542	10,8545	10,8548	10,8551	10,8554	10,8557	10,856
ППБ-18 /35	10	10	10,01	9,99	9,99	9,99	10,01	10	9,99	10,01	10,01	10,01	10	10,01	9,99	10	10,01	9,99	10	10
ППБ-18 /36	10,9903	10,9906	10,9909	10,9912	10,9915	10,9918	10,9921	10,9924	10,9927	10,993	10,9933	10,9936	10,9939	10,9942	10,9945	10,9948	10,9951	10,9954	10,9957	10,996
ППБ-18 /37	10,0203	10,0206	10,0209	10,0212	10,0215	10,0218	10,0221	10,0224	10,0227	10,023	10,0233	10,0236	10,0239	10,0242	10,0245	10,0248	10,0251	10,0254	10,0257	10,026
ППБ-18 /38	10,7003	10,7006	10,7009	10,7012	10,7015	10,7018	10,7021	10,7024	10,7027	10,703	10,7033	10,7036	10,7039	10,7042	10,7045	10,7048	10,7051	10,7054	10,7057	10,706
ППБ-18 /39	9,99	10	9,99	10,01	10,01	10,02	10	10	9,98	9,99	10,01	10,01	10,01	10	9,99	9,99	9,99	9,98	10,01	9,99
ППБ-18 /40	10,9703	10,9706	10,9709	10,9712	10,9715	10,9718	10,9721	10,9724	10,9727	10,973	10,9733	10,9736	10,9739	10,9742	10,9745	10,9748	10,9751	10,9754	10,9757	10,976
	Від x_{21} до x_{40}																			
	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}	x_{26}	x_{27}	x_{28}	x_{29}	x_{30}	x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{34}	x_{35}	x_{36}	x_{37}	x_{38}	x_{39}	x_{40}
ППБ-18/31	9,99	10,01	9,99	10,01	10	10	10,01	10	10,03	10	10	9,99	9,98	9,99	9,99	10	10	9,97	10	9,98
ППБ-18/32	10,01	9,99	9,99	9,99	10	9,99	9,99	9,99	10	10	10	9,98	10	10,01	10,02	9,99	9,99	10	9,99	9,99
ППБ-18/33	10,01	10	10,01	10	9,99	9,99	10,01	9,98	9,99	9,99	10	10,01	10,01	10,01	10,01	10	9,98	10	9,99	10,01
ППБ-18/34	10,8563	10,8566	10,8569	10,8572	10,8575	10,8578	10,8581	10,8584	10,8587	10,859	10,8593	10,8596	10,8599	10,8602	10,8605	10,8608	10,8611	10,8614	10,8617	10,862
ППБ-18/35	10,01	10,01	9,97	9,98	10,02	9,98	9,98	10,01	10,01	10,01	9,98	10	10	10,01	10,02	9,99	9,99	10	10	9,99
ППБ-18/36	10,9963	10,9966	10,9969	10,9972	10,9975	10,9978	10,9981	10,9984	10,9987	10,999	10,9993	10,9996	10,9999	11,0002	11,0005	11,0008	11,0011	11,0014	11,0017	11,002
ППБ-18/37	10,0263	10,0266	10,0269	10,0272	10,0275	10,0278	10,0281	10,0284	10,0287	10,029	10,0293	10,0296	10,0299	10,0302	10,0305	10,0308	10,0311	10,0314	10,0317	10,032
ППБ-18/38	10,7063	10,7066	10,7069	10,7072	10,7075	10,7078	10,7081	10,7084	10,7087	10,709	10,7093	10,7096	10,7099	10,7102	10,7105	10,7108	10,7111	10,7114	10,7117	10,712
ППБ-18/39	10	10,01	10	10	10	10,01	10,01	10	9,99	10,02	9,99	9,99	10,01	10	10,01	9,99	9,99	10	9,99	10,01
ППБ-18/40	10,9763	10,9766	10,9769	10,9772	10,9775	10,9778	10,9781	10,9784	10,9787	10,979	10,9793	10,9796	10,9799	10,9802	10,9805	10,9808	10,9811	10,9814	10,9817	10,982

Продовження табл. 4.8

Кодове позначення прикладу у БД	Векторний алфавіт вхідного вектору $X = \{x_k \mid k = \overline{1; 40}\}$ вимірюваних значень кута, φ_k , сек.																			
	Від x_1 до x_{20}																			
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}	x_{20}
ППБ-12 /41	60,0103	60,0106	60,0109	60,0112	60,0115	60,0118	60,0121	60,0124	60,0127	60,013	60,0133	60,0136	60,0139	60,0142	60,0145	60,0148	60,0151	60,0154	60,0157	60,016
ППБ-12 /42	60,0403	60,0406	60,0409	60,0412	60,0415	60,0418	60,0421	60,0424	60,0427	60,043	60,0433	60,0436	60,0439	60,0442	60,0445	60,0448	60,0451	60,0454	60,0457	60,046
ППБ-12 /43	60	59,99	60	60,01	60	60,01	60,01	59,99	59,98	59,99	60	59,99	60	59,97	60	59,99	60	60,01	59,99	59,99
ППБ-12 /44	60	60,01	60,01	60	60,02	59,99	60	59,99	60,01	59,99	60,02	59,99	59,99	60	60,01	59,98	60	59,99	60	59,99
ППБ-12 /45	60,5603	60,5606	60,5609	60,5612	60,5615	60,5618	60,5621	60,5624	60,5627	60,563	60,5633	60,5636	60,5639	60,5642	60,5645	60,5648	60,5651	60,5654	60,5657	60,566
ППБ-12 /46	59,99	60,01	60	60,01	59,98	59,99	60,01	60,01	59,99	59,99	60	59,99	59,99	59,98	60	60	60,01	60,02	60	60
ППБ-12 /47	59,8803	59,8806	59,8809	59,8812	59,8815	59,8818	59,8821	59,8824	59,8827	59,883	59,8833	59,8836	59,8839	59,8842	59,8845	59,8848	59,8851	59,8854	59,8857	59,886
ППБ-12 /48	60	60,01	60,01	59,99	60	60,02	60	60,02	60	60	60	60,01	60,01	59,98	60,01	59,99	60	60,01	60	60
ППБ-12 /49	59,7803	59,7806	59,7809	59,7812	59,7815	59,7818	59,7821	59,7824	59,7827	59,783	59,7833	59,7836	59,7839	59,7842	59,7845	59,7848	59,7851	59,7854	59,7857	59,786
ППБ-12 /50	59,99	60,01	60,01	60,02	59,99	59,99	60	60	60,01	60,01	59,99	59,99	60	60	60	60,01	60	59,99	60	59,98
	Від x_{21} до x_{40}																			
	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}	x_{26}	x_{27}	x_{28}	x_{29}	x_{30}	x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{34}	x_{35}	x_{36}	x_{37}	x_{38}	x_{39}	x_{40}
ППБ-12/41	60,0163	60,0166	60,0169	60,0172	60,0175	60,0178	60,0181	60,0184	60,0187	60,019	60,0193	60,0196	60,0199	60,0202	60,0205	60,0208	60,0211	60,0214	60,0217	60,022
ППБ-12/42	60,0463	60,0466	60,0469	60,0472	60,0475	60,0478	60,0481	60,0484	60,0487	60,049	60,0493	60,0496	60,0499	60,0502	60,0505	60,0508	60,0511	60,0514	60,0517	60,052
ППБ-12/43	60,01	60,02	60	60,02	59,98	60,01	60	59,99	60,01	60,01	60	60,02	60	59,99	60	60	60	60	60,01	59,99
ППБ-12/44	60	59,99	60,03	60,01	59,99	60,01	60	60	59,98	60	59,99	59,99	60	59,98	60,02	60	60,01	60	59,99	59,99
ППБ-12/45	60,5663	60,5666	60,5669	60,5672	60,5675	60,5678	60,5681	60,5684	60,5687	60,569	60,5693	60,5696	60,5699	60,5702	60,5705	60,5708	60,5711	60,5714	60,5717	60,572
ППБ-12/46	59,99	59,99	60,01	60	59,99	60	60	60,01	60,01	60	60	59,99	60	59,99	60	60	60	59,99	59,97	59,99
ППБ-12/47	59,8863	59,8866	59,8869	59,8872	59,8875	59,8878	59,8881	59,8884	59,8887	59,889	59,8893	59,8896	59,8899	59,8902	59,8905	59,8908	59,8911	59,8914	59,8917	59,892
ППБ-12/48	59,99	60,02	59,98	59,99	60	60,01	60	59,98	60	60	59,98	60,01	60,02	60	60,01	60	60	59,99	60,01	60,01
ППБ-12/49	59,7863	59,7866	59,7869	59,7872	59,7875	59,7878	59,7881	59,7884	59,7887	59,789	59,7893	59,7896	59,7899	59,7902	59,7905	59,7908	59,7911	59,7914	59,7917	59,792
ППБ-12/50	60	60,01	59,97	59,99	59,99	60	59,99	60	60	59,99	60	59,99	60,01	59,99	59,99	59,99	59,99	60	60	60,01

Закінчення табл. 4.8

Кодове позначення прикладу у БД	Векторний алфавіт вхідного вектору $X = \{x_k \mid k = \overline{1; 40}\}$ виміряних значень кута, φ_k , сек.																			
	Від x_1 до x_{20}																			
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}	x_{20}
ППБ-10 /51	69,8	69,96	69,91	70,15	69,85	69,79	70,04	69,76	70,32	70,03	70,15	70,22	69,94	69,97	70,03	70,17	70,28	69,88	70,04	69,93
ППБ-10 /52	70,7803	70,7806	70,7809	70,7812	70,7815	70,7818	70,7821	70,7824	70,7827	70,783	70,7833	70,7836	70,7839	70,7842	70,7845	70,7848	70,7851	70,7854	70,7857	70,786
ППБ-10 /53	69,84	69,85	70,03	70	69,91	70,13	70,2	70,05	70,2	69,82	69,94	70,22	69,76	69,68	70,17	69,88	70,06	70,51	69,31	69,99
ППБ-10 /54	70,7903	70,7906	70,7909	70,7912	70,7915	70,7918	70,7921	70,7924	70,7927	70,793	70,7933	70,7936	70,7939	70,7942	70,7945	70,7948	70,7951	70,7954	70,7957	70,796
ППБ-10 /55	70,24	70,01	69,9	69,95	69,77	69,95	70,01	70,46	70,12	69,92	69,84	70,31	69,96	69,92	69,75	70,05	70,24	69,83	69,92	70,31
ППБ-10 /56	70,0303	70,0306	70,0309	70,0312	70,0315	70,0318	70,0321	70,0324	70,0327	70,033	70,0333	70,0336	70,0339	70,0342	70,0345	70,0348	70,0351	70,0354	70,0357	70,036
ППБ-10 /57	70,07	69,47	69,65	70,28	70,04	69,66	69,55	69,86	70,03	69,73	70	69,65	70,07	70,12	70,06	70,26	70,02	69,9	70,01	69,6
ППБ-10 /58	69,97	69,74	70,43	69,95	69,84	70,01	69,92	69,93	70,25	69,83	69,6	70,13	69,83	70,34	69,9	70,11	69,87	70,43	70,41	69,88
ППБ-10 /59	70,9303	70,9306	70,9309	70,9312	70,9315	70,9318	70,9321	70,9324	70,9327	70,933	70,9333	70,9336	70,9339	70,9342	70,9345	70,9348	70,9351	70,9354	70,9357	70,936
ППБ-10 /60	69,9303	69,9306	69,9309	69,9312	69,9315	69,9318	69,9321	69,9324	69,9327	69,933	69,9333	69,9336	69,9339	69,9342	69,9345	69,9348	69,9351	69,9354	69,9357	69,936
	Від x_{21} до x_{40}																			
	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}	x_{26}	x_{27}	x_{28}	x_{29}	x_{30}	x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{34}	x_{35}	x_{36}	x_{37}	x_{38}	x_{39}	x_{40}
ППБ-10/ 51	70,02	69,84	69,73	69,81	70,15	69,98	69,84	69,96	69,86	69,9	70,16	70,1	70,2	70,32	70,27	70,01	70,01	70,12	70,33	70,01
ППБ-10/ 52	70,7863	70,7866	70,7869	70,7872	70,7875	70,7878	70,7881	70,7884	70,7887	70,789	70,7893	70,7896	70,7899	70,7902	70,7905	70,7908	70,7911	70,7914	70,7917	70,792
ППБ-10/ 53	70,03	69,9	70,16	70,07	69,89	69,66	69,49	70,2	69,87	70,16	69,86	69,8	70	70,34	69,88	69,91	70,52	70,21	69,75	69,54
ППБ-10/ 54	70,7963	70,7966	70,7969	70,7972	70,7975	70,7978	70,7981	70,7984	70,7987	70,799	70,7993	70,7996	70,7999	70,8002	70,8005	70,8008	70,8011	70,8014	70,8017	70,802
ППБ-10/ 55	69,74	70,14	69,82	70,1	69,91	69,69	69,88	69,86	70,14	70,24	70,02	69,69	70,11	69,74	70,21	70,16	70	69,99	69,71	70,3
ППБ-10/ 56	70,0363	70,0366	70,0369	70,0372	70,0375	70,0378	70,0381	70,0384	70,0387	70,039	70,0393	70,0396	70,0399	70,0402	70,0405	70,0408	70,0411	70,0414	70,0417	70,042
ППБ-10/ 57	69,65	70	69,99	69,55	70,15	69,98	70,04	69,97	70,16	70,04	69,6	70,24	70,08	69,67	69,8	70,14	69,89	70,14	70,43	70,05
ППБ-10/ 58	70,29	69,81	69,8	70,13	70,46	70,03	69,78	69,85	70,08	70,36	69,94	69,93	69,78	70,1	70,08	69,58	69,89	69,94	69,92	69,88
ППБ-10/ 59	70,9363	70,9366	70,9369	70,9372	70,9375	70,9378	70,9381	70,9384	70,9387	70,939	70,9393	70,9396	70,9399	70,9402	70,9405	70,9408	70,9411	70,9414	70,9417	70,942
ППБ-10/ 60	69,9363	69,9366	69,9369	69,9372	69,9375	69,9378	69,9381	69,9384	69,9387	69,939	69,9393	69,9396	69,9399	69,9402	69,9405	69,9408	69,9411	69,9414	69,9417	69,942

Таблиця 4.9

Вихідний вектор навчальної множини запропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання за результатами вимірювання плоских кутів робочими та еталонними засобами для регулювання і настройки кутомірних приладів і безпосереднього вимірювання кутів промислових виробів ГОСТ 2875-88

Кодове позначення прикладу у БД за табл. 4.6	Значення критерію Фішера			Примітка	Вихідний вектор	
	розрахункове F	табличне F_q			y_1	y_2
		$F_{0,01} \mid P = 0,99$	$F_{0,05} \mid P = 0,95$			
ППБ-24 /1	4,03	4,41	2,28	Ймовірність наявності випадкової похибки становить 99%, систематичної – 95%	1	0
ППБ-24 /2	18,1818	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0
ППБ-24 /3	0,0719	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-24 /4	18,1818	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0
ППБ-24 /5	0,3536	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-24 /6	0,0469	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-24 /7	0,0136	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-24 /8	0,0056	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-24 /9	18,1818	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0
ППБ-24 /10	0,1029	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0
ППБ-8 /11	0,0767	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-8 /12	0,1379	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-8 /13	0,049	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-8 /14	0,056	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-8 /15	0,0229	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-8 /16	18,1818	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0
ППБ-8 /17	18,1818	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0
ППБ-8 /18	18,1818	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0
ППБ-8 /19	18,1818	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0
ППБ-8 /20	18,1818	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0

Продовження табл. 4.9

Кодове позначення прикладу у БД за табл. 4.6	Значення критерію Фішера			Примітка	Вихідний вектор	
	розрахункове F	табличне F_q			y_1	y_2
		$F_{0,01} \mid P = 0,99$	$F_{0,05} \mid P = 0,95$			
ППБ-6 /21	0,0158	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-6 /22	18,1818	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0
ППБ-6 /23	0,0604	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-6 /24	18,1818	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0
ППБ-6 /25	0,0710	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-6 /26	18,1818	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0
ППБ-6 /27	18,1818	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0
ППБ-6 /28	0,2749	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-6 /29	0,1387	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-6 /30	18,1818	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0
ППБ-18 /31	0,3073	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-18 /32	0,0073	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-18 /33	0,0760	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-18 /34	18,1818	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0
ППБ-18 /35	0,0240	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-18 /36	18,1818	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0
ППБ-18 /37	18,1818	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0
ППБ-18 /38	18,1818	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0
ППБ-18 /39	0,0771	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-18 /40	18,1818	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0

Закінчення табл. 4.9

Кодове позначення прикладу у БД за табл. 4.6	Значення критерію Фішера			Примітка	Вихідний вектор	
	розрахункове F	табличне F_q			y_1	y_2
		$F_{0,01} \mid P = 0,99$	$F_{0,05} \mid P = 0,95$			
ППБ-12 /41	18,1818	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0
ППБ-12 /42	18,1818	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0
ППБ-12 /43	0,1884	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-12 /44	0,0491	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-12 /45	18,1818	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0
ППБ-12 /46	0,0951	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-12 /47	18,1818	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0
ППБ-12 /48	0,0963	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-12 /49	18,1818	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0
ППБ-12 /50	0,1636	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-10 /51	0,5815	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-10 /52	18,1818	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0
ППБ-10 /53	0,0112	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-10 /54	18,1818	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0
ППБ-10 /55	0,0293	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-10 /56	18,1818	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0
ППБ-10 /57	0,0998	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-10 /58	0,1002	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-10 /59	18,1818	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0
ППБ-10 /60	18,1818	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0

Необхідна і достатня кількість вимірювань для кожної призми попередньо була визначена за пропонованою методикою визначення оптимальної кількості вимірювань при нормуванні випадкової складової похибки вимірювання (див. розділ 3, п. 3.3) і становить 37, при вимірюванні з точністю до 0,01" та надійністю (довірчою ймовірністю) 0,98. Проте, пропонується збільшити кількість вимірювань для кожної призми до 40, для зручності обчислень дисперсійного критерію Фішера, що є необхідним для визначення яка саме складова (систематична чи випадкова) похибки вимірювання міститься у результатах багаторазових спостережень та для формування навчальної множини.

Кожному вхідному вектору $X = (x_1, x_2, \dots, x_s)$, що описується виразом (4.7) відповідає вектор бажаних вихідних сигналів $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$, що описується виразом (4.8) і являє собою результат визначення наявності відповідної складової (систематичної або випадкової) похибки вимірювання у відповідній множині результатів багаторазових вимірювань величини плоского кута відповідної багатогранної призми (табл. 4.7). В навчальній множині наявність систематичної або випадкової складової похибок вимірювання здійснювалось із застосуванням аналітично-розрахункової процедури за дисперсійним критерієм Фішера. Отримані результати представлено в табл. 4.9.

З врахуванням того, що точність навчання та роботи пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання в подальшому залежить від досконалості навчальної множини, то при її формуванні було дотримано наступних загальних вимог [31, 35]:

1. Відсутність протиріч в навчальній множині, тобто навчальна множина не містить приклади з однаковими умовами і різними відповідями (однаковими вхідними векторами але різними вихідними);
2. Охоплення всієї множини ситуацій, тобто дотримання рівномірності розподілення прикладів, (кількість відповідей (вихідних векторів) для кожної групи прикладів (вхідних векторів) є однаковою).

Таблиці (табл. 4.7 – табл. 4.9) навчальної множини містять:

1. Опис множини об'єктів вимірювання, тобто багатогранних призм за ГОСТ 2875-88, обраних довільним чином, які є робочими та еталонними засобами для регулювання і настройки кутомірних приладів і безпосереднього вимірювання

кутів промислових виробів (табл. 4.7);

2. Множину результатів багаторазових вимірювань величин плоских кутів багатогранних призм, наприклад, при їх атестації, що отримані із інформаційного джерела [39] та за результатами імітаційного моделювання на ЕОМ. Множини результатів багаторазових вимірювань величин плоских кутів багатогранних призм подаються у векторній формі відповідно до вимог нейромережових технологій (табл. 4.8);

3. Результати визначення складових похибок вимірювання за дисперсійним критерієм Фішера яка саме складова похибки вимірювання (випадкова чи систематична) міститься у результатах багаторазових вимірювань величин плоских кутів багатогранних призм, наприклад, при їх атестації (табл. 4.9).

Навчання пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання необхідно проводити за методом „навчання з вчителем” [27, 28]. Цей метод передбачає послідовну подачу даних із навчальної БД на вхід пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання з наступним обчисленням похибки (помилки) E , яка відображає величину відхилення фактичного $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ значення отриманого на виходах пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання від бажаного $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ (рис. 4.4).

Математично процес навчання пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання можна описати наступним чином. Під час функціонування пропонована ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання формує вихідний сигнал Y у відповідності до вхідного сигналу X , реалізуючи деяку функцію $Y=G(X)$. Так як архітектура пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання попередньо задана (ШНМ побудовано за моделлю багатошарового перцептрону), то вид функції G визначається значеннями синаптичних ваг та зміщень пропонованої ШНМ. Нехай розв’язком задачі є функція $Y=F(X)$, задана парами вхідних та вихідних даних $\langle X, Y \rangle$ для яких існує $Y_N=F(X_N)$. Навчання полягає у пошуку функції G , близької до F за змістом деякої функції помилки E . Якщо синтезована множина навчальних прикладів та спосіб обчислення функції помилки E , то навчання пропонованої ШНМ перетворюється у задачу багатомірної оптимізації великої розмірності, при

цьому, так як функція E може мати довільний вид, навчання в загальному випадку це багато екстремальна задача оптимізації.

Для розв'язання цієї задачі можуть бути використані різні алгоритми, які детально описані в літературі [27, 28]. Найбільш розповсюдженим алгоритмом навчання є алгоритм зворотного розповсюдження помилки (back propagation), який широко застосовується для навчання багатошарових ШНМ з послідовними зв'язками. Хоча вказаний алгоритм має недолік, що полягає у відносній повільності навчання ШНМ через необхідність виконання великої кількості ітерацій, що вимагається для досягнення мінімуму помилки при його реалізації, він вигідно відрізняється від інших простотою реалізації, порівняно високою стійкістю і надійністю роботи.

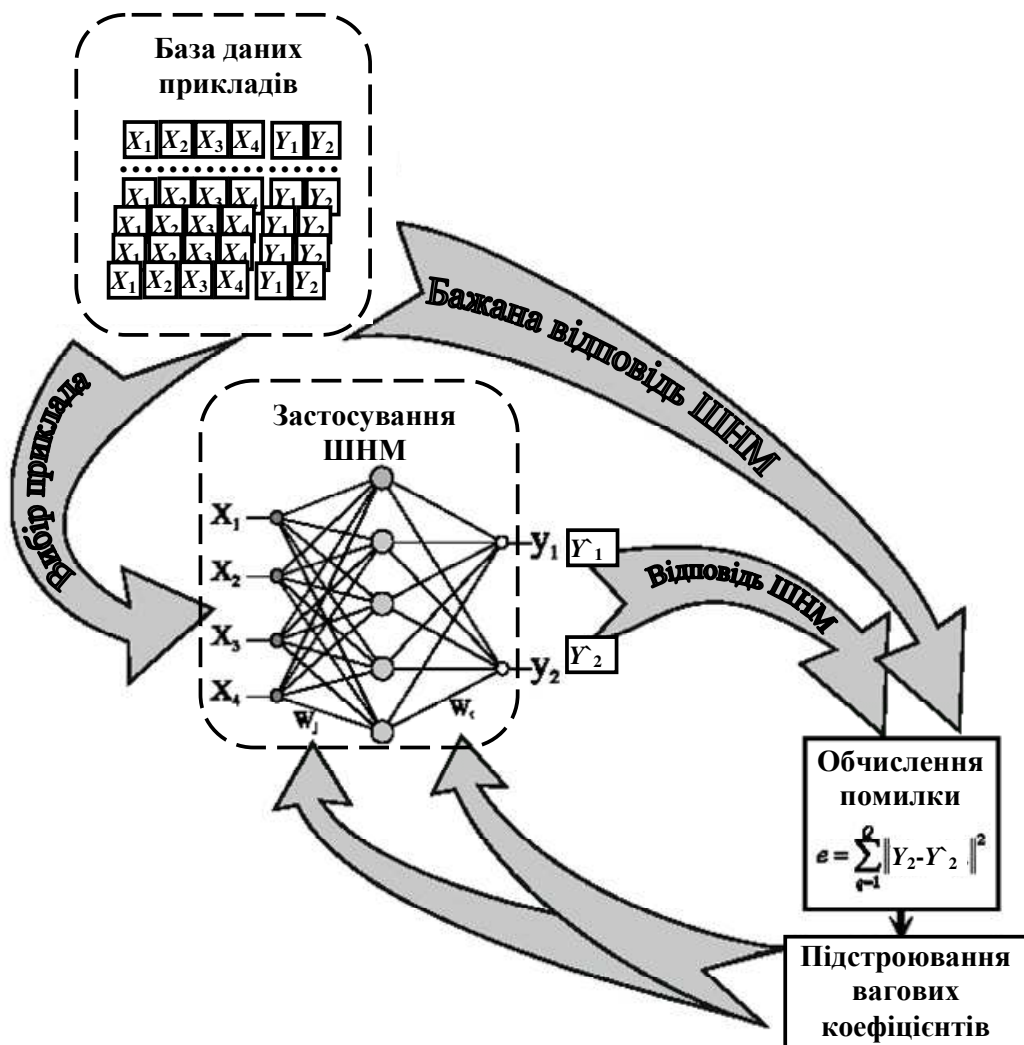


Рис. 4.5. Узагальнена схема навчання ШНМ

ШНМ, що використовують алгоритм зворотного розповсюдження помилки, є потужним інструментом пошуку закономірностей, прогнозування та якісного

аналізу, завдяки чому отримали широке розповсюдження [25, 28].

Опис алгоритму back propagation представлено наступним чином.

Крок 1. Синаптичним вагам довільним чином надаються невеликі початкові значення в діапазоні від 0 до 1.

Крок 2. Обирається чергова навчальна пара із навчальної множини $\langle X, Y \rangle$; вектор $X = (x_1, x_2, \dots, x_s)$ подається на вхід пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання.

Крок 3. Обчислюється вихід пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$.

Крок 4. Обчислюється різниця між бажаним значенням виходу $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ та фактичним (обчисленим) $\hat{Y} = (\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n)$ виходом пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання.

Крок 5. Синаптичні ваги коригуються таким чином, щоб мінімізувати помилку E (спочатку коригуються ваги вихідного шару, потім, з використанням правила диференціювання складної функції і похідної сигмоїдної функції – ваги попереднього шару і т.д.).

Крок 6. Повторюються кроки з 2-го по 5-тй для кожної пари навчальної множини до тих пір, поки похибка на всій множині не досягне деякого заданого прийняттого значення.

Так як алгоритм діє циклічно (ітеративно), то його цикли прийнято називати епохами. Процес навчання припиняється тоді коли пройдена певна кількість епох або коли похибка досягає деякого певного мінімального значення, або коли похибка перестає зменшуватись.

4.5.3 Практична реалізація та навчання штучної нейронної мережі автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання

Практична реалізація пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання здійснена шляхом розробки її програмної моделі, з використанням нейроімітатора Neural Analyzer аналітичного пакету Deductor Professional (Lite-версії) [25], та табличного процесора Excel. На входи пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання

подається вхідний вектор X зміст компонент якого описано виразом (4.7) та табл. 4.3 – табл. 4.8. Загальна кількість входів пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання відповідає кількості результатів спостереження і становить 40 (див. п. 4.4). Відповідно кількість вхідних нейронів пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання дорівнює 40. На виході пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання формується вихідний вектор Y з відповідною кількістю компонент, зміст яких описано виразом (4.8) та табл. 4.6. Кількість компонент вихідного вектору Y становить 2 і відповідає кількості виходів пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання. Відповідно кількість вихідних нейронів пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання дорівнює 2.

Спрощена структура пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання приведена на рис. 4.6.

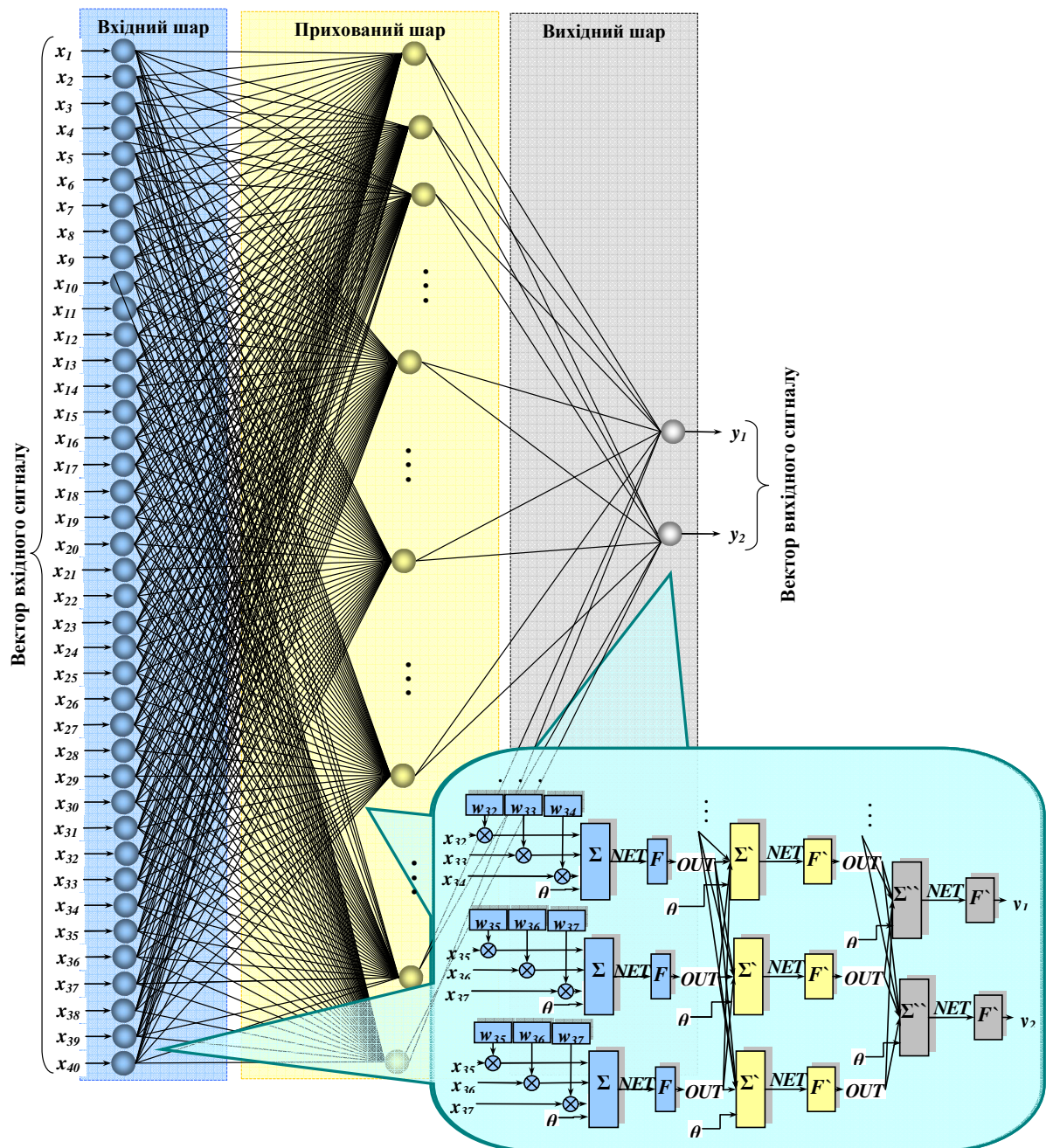


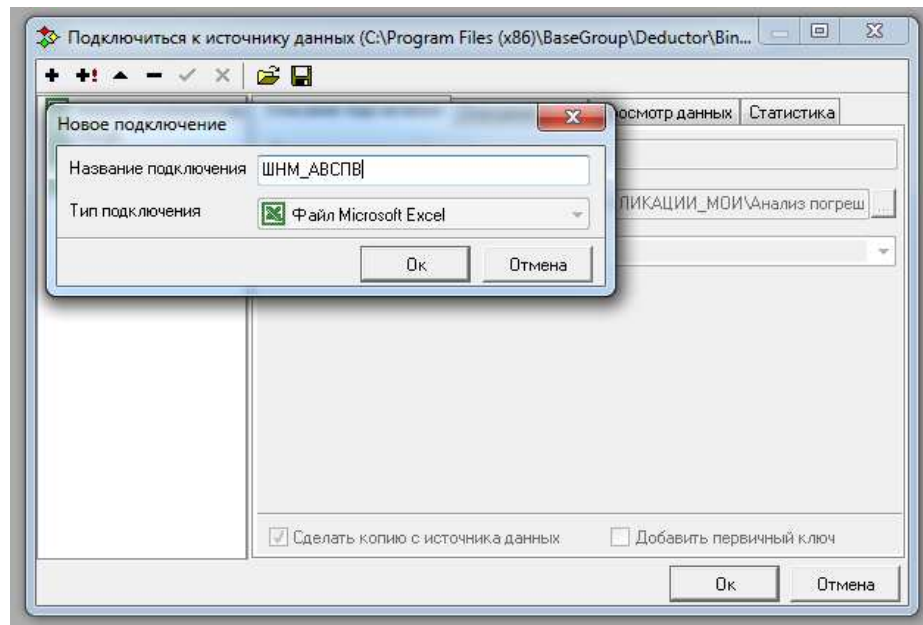
Рис. 4.6. Спрощена структурна схема запропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання

Навчання запропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання повинно проводитись методом “навчання з вчителем” за алгоритмом back propagation (див. п. 4.4).

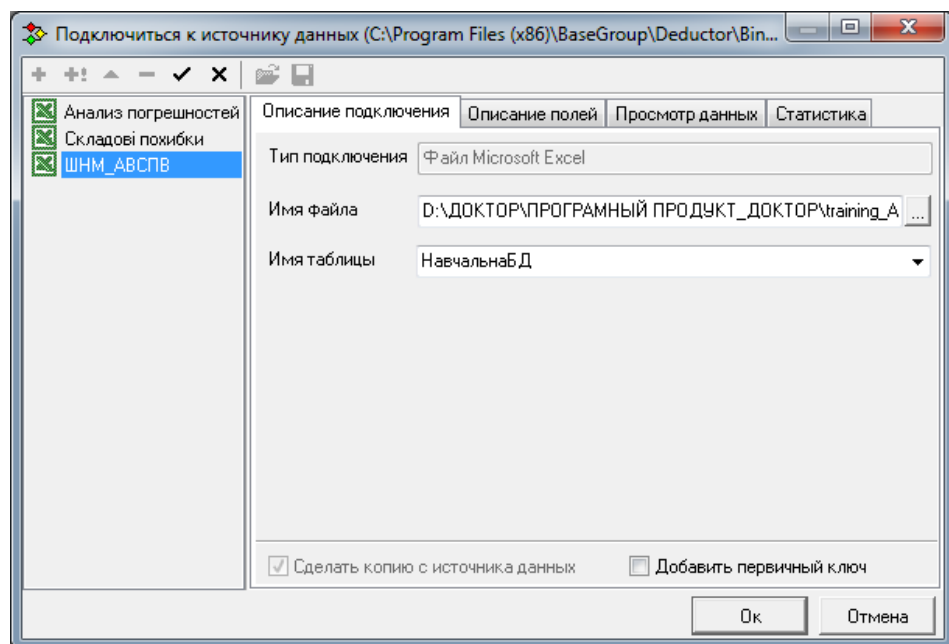
Процес навчання запропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання відбувається наступним чином.

1. Пропонована ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання підключається до джерела даних в середовищі нейроімітатора Neural

Analyzer аналітичного пакету Deductor Professional (Lite-версії) [25] (рис. 4.7). Джерелом даних є файл Excel training_ANN.xls, що містить навчальну множину (табл. 4.8, табл. 4.9). Екранна форма training_ANN.xls з введеними даними навчальної множини із табл. 4.8 та табл. 4.9 приведена на рис. 4.11.



а)



б)

Рис. 4.7. Підключення запропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання до джерела даних: а) крок 1, б) крок 2

2. Задаються параметри вхідних X та вихідних Y векторів запропонованої

ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання та проводиться їх нормування (рис. 4.8).

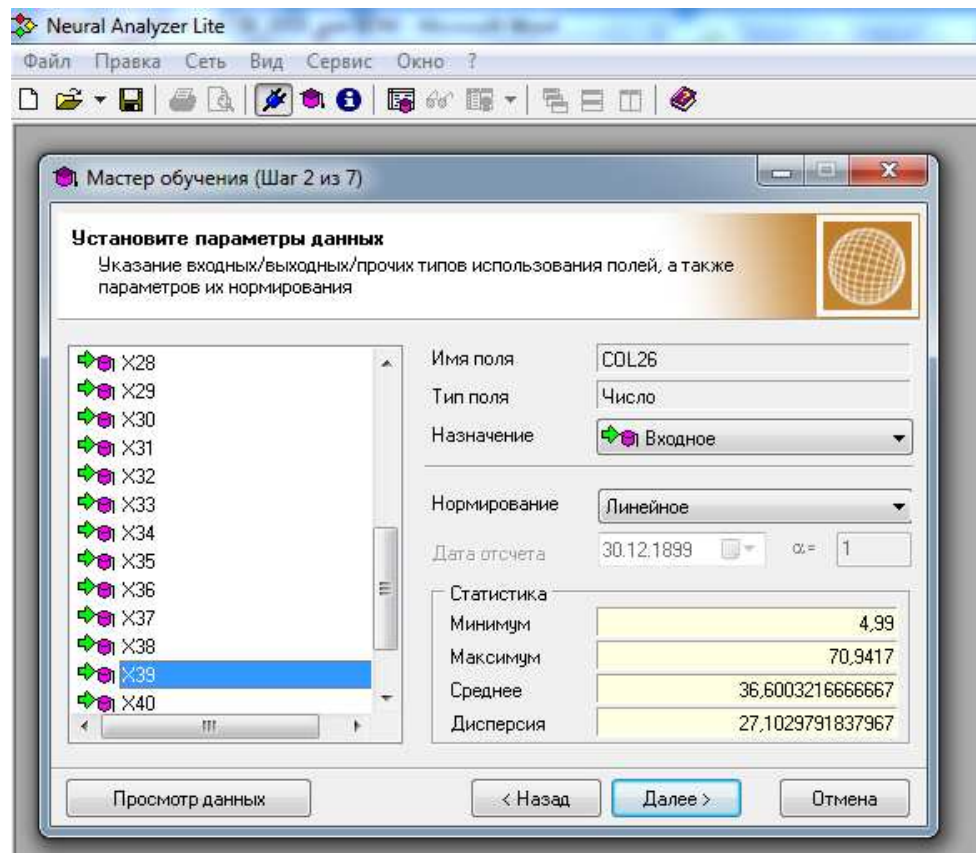


Рис. 4.8. Встановлення параметрів вхідних X та вихідних Y векторів пропонуваної ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання

3. Налаштовуються параметри пропонуваної ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання, зокрема обирається алгоритм навчання – back propagation, активаційна функція – сигмоїда; швидкість навчання встановлюється 0,10; момент приймається рівним 0,90 (рис. 4.9).

Швидкість навчання – параметр алгоритму навчання мережі, який керує величиною кроку при ітераційному підстроюванні синаптичних ваг ШНМ; приймає значення в діапазоні 0 ... 1. При великій величині кроку збіжність буде швидшою, і відповідно навчання пропонуваної ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання буде швидшим, але є небезпека „перескочити” через рішення. З іншого боку, при малій величині кроку навчання потребуватиме великої кількості ітерацій, що значно уповільнює цей процес. На практиці величина кроку приймається пропорційною крутизни схилу функції активації так,

що алгоритм уповільнюється при наближенні до мінімуму функції помилки. Підбір оптимальної швидкості навчання як правило здійснюється експериментальним шляхом [25].

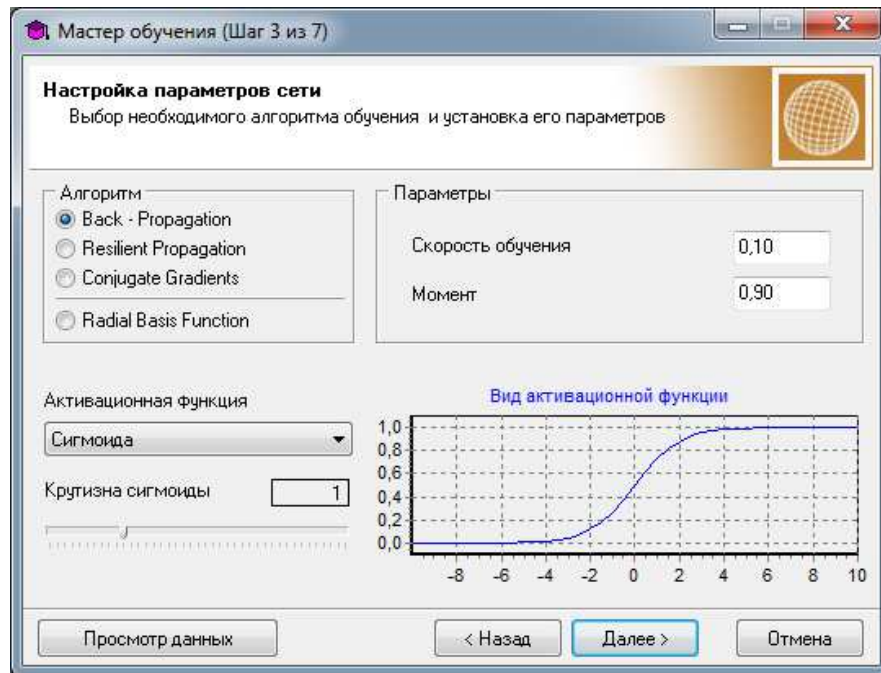


Рис. 4.9. Налаштування параметрів запропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання: алгоритму навчання, вибір функції активації, швидкості навчання та моменту

Момент – величина, що впливає на корекцію синаптичних ваг при навчанні ШНМ. Змінюється в інтервалі 0 ... 1. Рекомендоване значення $0,9 \pm 0,1$ [25].

4. Задається топологія запропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання: кількість входів – 40, кількість виходів – 2, кількість нейронів прихованого шару до початку навчання приймається рівною 40 (рис. 4.9). Причому в залежності від результатів навчання, може бути проведена оптимізація структури запропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання і змінена розмірність прихованого шару.

5. На входи запропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання із навчальної множини подається вектор вхідних сигналів X_n (рис. 4.10, рис. 4.11), зміст компонент якого, описано виразом (4.7) та табл. 4.3 – табл. 4.8, а також обчислюється зважена сума вхідних сигналів NET_{nj} за виразом (4.4) (див. п. 4.3).

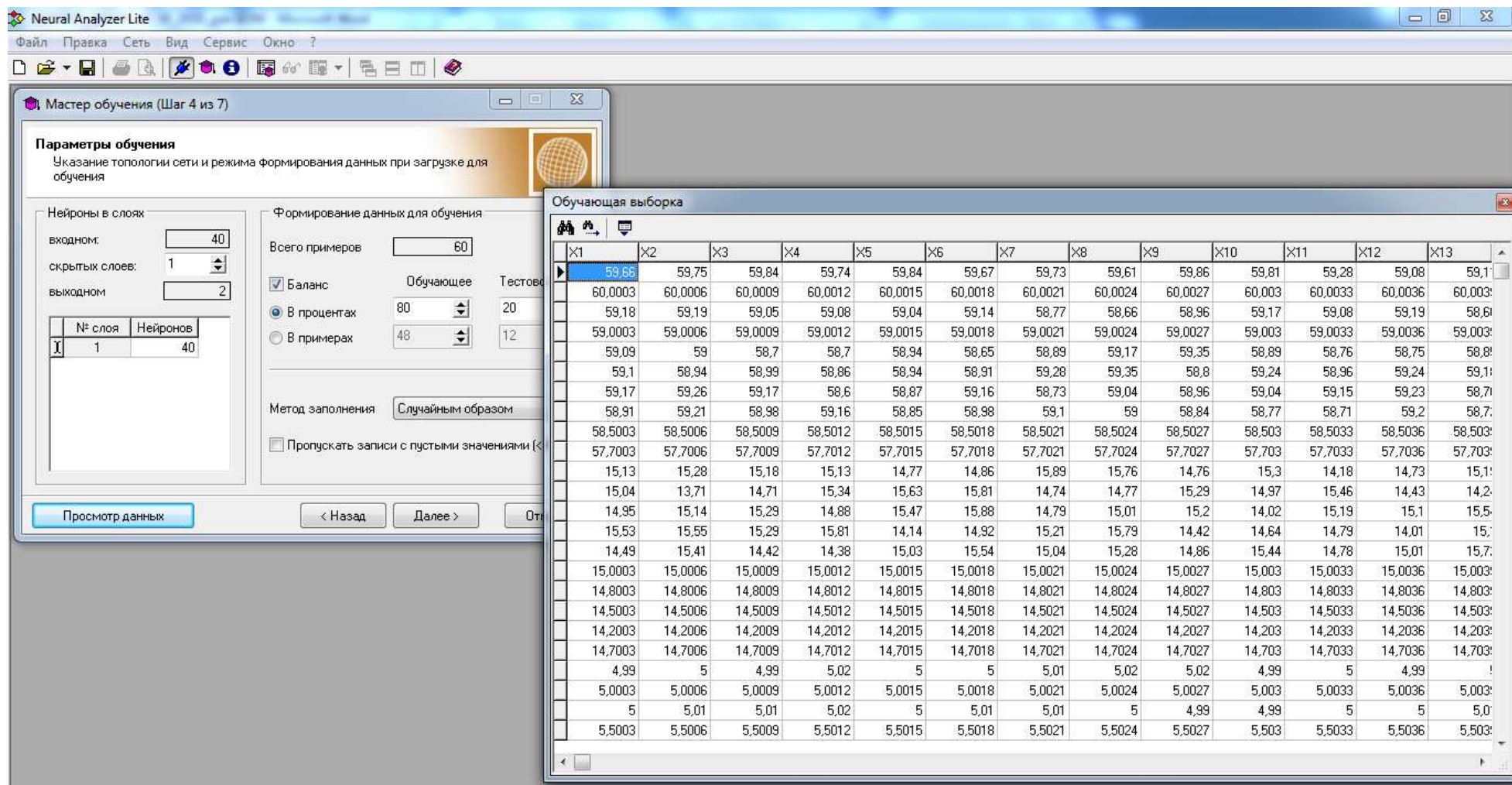


Рис. 4. 10. Встановлення топології пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання та дані навчальної множини

Microsoft Excel - training_ANN

Файл Правка Вид Вставка Формат Сервис Данные Окно Справка

Введите вопрос

68% Times New Roman 12

D108 ППБ-12

№ з/п	X14	X15	X16	X17	X18	X19	X20	X21	X22	X23	X24	X25	X26	X27	X28	X29	X30	X31	X32	X33	X34	X35	X36	X37	X38	X39	X40	Y1	Y2	
1	59.16	59.18	59.11	59.37	59.33	59.37	59.37	59.42	59.43	59.36	59.35	59.34	59.27	59.36	59.05	59.18	59.18	59.43	59.23	59.28	59.36	59.32	59.18	59.35	59.03	58.91	59.12	1	0	
2	60.0042	60.0045	60.0048	60.0051	60.0054	60.0057	60.006	60.0063	60.0066	60.0069	60.0072	60.0075	60.0078	60.0081	60.0084	60.0087	60.009	60.0093	60.0096	60.0099	60.0102	60.0105	60.0108	60.0111	60.0114	60.0117	60.012	1	0	
3	59.04	58.65	58.88	58.96	58.63	58.95	59.38	59.18	58.93	58.8	59.14	59.15	58.71	59.43	59.14	58.78	59.29	59.2	58.95	58.45	59.4	59.46	58.94	59.13	59.02	59.32	59.08	0	1	
4	59.0042	59.0045	59.0048	59.0051	59.0054	59.0057	59.006	59.0063	59.0066	59.0069	59.0072	59.0075	59.0078	59.0081	59.0084	59.0087	59.009	59.0093	59.0096	59.0099	59.0102	59.0105	59.0108	59.0111	59.0114	59.0117	59.012	1	0	
5	59.05	59.05	58.66	59.01	59.15	58.92	58.86	59.11	58.84	59.21	58.84	59.21	59.16	59.03	59.38	58.75	58.92	59.03	58.97	59.37	59.28	59.05	59.07	59.32	59.16	59.33	0	1		
6	58.93	59.41	58.42	59.04	58.96	58.63	59.12	58.71	58.82	58.95	59.2	58.91	58.79	58.91	59.03	59.14	58.85	58.97	59.01	58.86	59.13	59.16	59.12	58.57	58.96	59.19	59.06	0	1	
7	59.07	58.69	59.03	59.34	58.81	59.3	59.05	58.86	58.74	58.8	59.29	58.84	58.8	58.89	59.16	59.15	59.21	59.08	59.04	59.08	58.99	58.93	59	58.93	58.77	58.9	59	0	1	
8	59.32	58.85	58.87	58.89	59.09	58.98	59.19	59.36	59.11	59.11	58.88	59.23	58.76	59.04	58.58	58.97	59.07	58.9	58.72	59.15	59.06	59.21	58.81	59.05	58.74	59.14	59.08	0	1	
9	58.5042	58.5045	58.5048	58.5051	58.5054	58.5057	58.506	58.5063	58.5066	58.5069	58.5072	58.5075	58.5078	58.5081	58.5084	58.5087	58.509	58.5093	58.5096	58.5099	58.5102	58.5105	58.5108	58.5111	58.5114	58.5117	58.512	1	0	
10	57.7042	57.7045	57.7048	57.7051	57.7054	57.7057	57.706	57.7063	57.7066	57.7069	57.7072	57.7075	57.7078	57.7081	57.7084	57.7087	57.709	57.7093	57.7096	57.7099	57.7102	57.7105	57.7108	57.7111	57.7114	57.7117	57.712	1	0	
11	15.11	15.12	14.61	14.89	14.34	14.96	15.55	14.73	14.41	15.61	15.15	15.02	14.98	14.86	14.82	15	14.42	13.41	16.17	14.06	15.37	15.4	16.24	14.45	14.87	14.58	15	0	1	
12	15.13	15.28	14.92	16.41	15.81	14.47	16.17	15.75	15.43	14.49	15.03	15.31	15.87	15.29	15.09	15.48	15.01	15.87	14.26	14.31	14.75	14.89	15.09	15.4	14.54	15.92	15	0	1	
13	15.7	14.67	14.93	15.03	14.31	14.66	14.45	14.63	14.96	14.62	15.68	14.85	15.17	15.24	14.76	15.58	15.53	14.71	14.89	15.69	15.76	14.19	14.71	14.4	15.5	14.34	14.46	0	1	
14	15.44	15.19	14.81	15.32	14.71	14.97	14.33	14.46	14.78	14.7	15.31	14.67	14.57	15.57	15.5	15.57	15.22	15.81	15.19	15.56	15.62	14.75	14.96	15.19	14.33	14.87	14.61	0	1	
15	15.32	15.52	14.59	15.06	14.88	14.85	15.31	14.94	15.19	15.04	14.87	15.57	15.47	15.05	13.96	14.67	14.9	14.41	15.02	14.46	14.89	15.6	15.4	14.38	15.27	15.47	14.84	0	1	
16	15.0042	15.0045	15.0048	15.0051	15.0054	15.0057	15.006	15.0063	15.0066	15.0069	15.0072	15.0075	15.0078	15.0081	15.0084	15.0087	15.009	15.0093	15.0096	15.0099	15.0102	15.0105	15.0108	15.0111	15.0114	15.0117	15.012	1	0	
17	14.8042	14.8045	14.8048	14.8051	14.8054	14.8057	14.806	14.8063	14.8066	14.8069	14.8072	14.8075	14.8078	14.8081	14.8084	14.8087	14.809	14.8093	14.8096	14.8099	14.8102	14.8105	14.8108	14.8111	14.8114	14.8117	14.812	1	0	
18	14.5042	14.5045	14.5048	14.5051	14.5054	14.5057	14.506	14.5063	14.5066	14.5069	14.5072	14.5075	14.5078	14.5081	14.5084	14.5087	14.509	14.5093	14.5096	14.5099	14.5102	14.5105	14.5108	14.5111	14.5114	14.5117	14.512	1	0	
19	14.2042	14.2045	14.2048	14.2051	14.2054	14.2057	14.206	14.2063	14.2066	14.2069	14.2072	14.2075	14.2078	14.2081	14.2084	14.2087	14.209	14.2093	14.2096	14.2099	14.2102	14.2105	14.2108	14.2111	14.2114	14.2117	14.212	1	0	
20	14.7042	14.7045	14.7048	14.7051	14.7054	14.7057	14.706	14.7063	14.7066	14.7069	14.7072	14.7075	14.7078	14.7081	14.7084	14.7087	14.709	14.7093	14.7096	14.7099	14.7102	14.7105	14.7108	14.7111	14.7114	14.7117	14.712	1	0	
21	5.02	5.01	4.99	4.99	5	5.01	5.01	5.02	5.01	4.98	5	5	5.02	5	4.99	5.01	5.01	5.01	5.01	4.99	4.98	5	5.02	5.01	4.99	5.01	4.99	5.01	0	1
22	5.0042	5.0045	5.0048	5.0051	5.0054	5.0057	5.006	5.0063	5.0066	5.0069	5.0072	5.0075	5.0078	5.0081	5.0084	5.0087	5.009	5.0093	5.0096	5.0099	5.0102	5.0105	5.0108	5.0111	5.0114	5.0117	5.012	1	0	
23	5	5	4.99	5.01	4.98	4.99	5.01	5	5	4.99	5.01	4.99	5	5.01	5	4.98	5	5	5	4.99	4.99	5	5.01	5	4.99	5.02	0	1		
24	5.5042	5.5045	5.5048	5.5051	5.5054	5.5057	5.506	5.5063	5.5066	5.5069	5.5072	5.5075	5.5078	5.5081	5.5084	5.5087	5.509	5.5093	5.5096	5.5099	5.5102	5.5105	5.5108	5.5111	5.5114	5.5117	5.512	1	0	
25	5.01	5	5	4.98	5.01	5.01	5.02	5.03	5	4.98	5.01	4.99	5.01	4.99	5	5.01	5.02	5	5	5.02	5.01	4.99	5	4.99	5	5	5	0	1	
26	6.0042	6.0045	6.0048	6.0051	6.0054	6.0057	6.006	6.0063	6.0066	6.0069	6.0072	6.0075	6.0078	6.0081	6.0084	6.0087	6.009	6.0093	6.0096	6.0099	6.0102	6.0105	6.0108	6.0111	6.0114	6.0117	6.012	1	0	
27	5.9042	5.9045	5.9048	5.9051	5.9054	5.9057	5.906	5.9063	5.9066	5.9069	5.9072	5.9075	5.9078	5.9081	5.9084	5.9087	5.909	5.9093	5.9096	5.9099	5.9102	5.9105	5.9108	5.9111	5.9114	5.9117	5.912	1	0	
28	5	5.02	5	5	5.03	5.01	5	4.99	5	4.99	5	4.99	4.99	5	4.99	5.01	5	4.99	4.99	5.02	5.01	4.99	5	5.01	5.01	5.01	5.01	0	1	
29	5.01	4.98	5.01	5.01	5.01	4.99	4.98	5.01	5.01	5.01	5	5.02	5.01	5	4.98	5	4.99	5	4.98	4.99	4.98	5	4.99	5.01	4.99	4.99	0	1		
30	5.7542	5.7545	5.7548	5.7551	5.7554	5.7557	5.756	5.7563	5.7566	5.7569	5.7572	5.7575	5.7578	5.7581	5.7584	5.7587	5.759	5.7593	5.7596	5.7599	5.7602	5.7605	5.7608	5.7611	5.7614	5.7617	5.762	1	0	
31	9.99	9.99	10	10	9.97	10.01	10.01	9.99	10.01	9.99	10.01	9.99	10.01	10	10.01	10	10.03	10	10	9.99	9.98	9.99	10	10	9.97	10	9.98	0	1	
32	10	10	9.99	9.99	9.99	10	9.99	10.01	9.99	9.99	9.99	10	9.99	9.99	9.99	10	10	10	9.98	10	10.01	10.02	9.99	9.99	10	9.99	9.99	0	1	
33	10.01	10.01	10.01	10	9.99	10	9.99	10.01	10	10.01	10	9.99	9.99	10.01	9.98	9.99	9.99	10	10.01	10.01	10.01	10.01	10	9.98	10	9.99	10.01	0	1	
34	10.8542	10.8545	10.8548	10.8551	10.8554	10.8557	10.856	10.8563	10.8566	10.8569	10.8572	10.8575	10.8578	10.8581	10.8584	10.8587	10.859	10.8593	10.8596	10.8599	10.8602	10.8605	10.8608	10.8611	10.8614	10.8617	10.862	1	0	
35	10.01	9.99	10	10.01	9.99	10	10	10.01	10.01	9.97	9.98	10.02	9.98	9.98	10.01	10.01	10.01	9.98	10	10	10.01	10.02	9.99	9.99	10	10	9.99	0	1	
36	10.9942	10.9945	10.9948	10.9951	10.9954	10.9957	10.996	10.9963	10.9966	10.9969	10.9972	10.9975	10.9978	10.9981	10.9984	10.9987	10.999	10.9993	10.9996	10.9999	11.0002	11.0005	11.0008	11.0011	11.0014	11.0017	11.002	1	0	
37	10.0242	10.0245	10.0248	10.0251	10.0254	10.0257	10.026	10.0263	10.0266	10.0269	10.0272	10.0275	10.0278	10.0281	10.0284	10.0287	10.029	10.0293	10.0296	10.0299	10.0302	10.0305	10.0308	10.0311	10.0314	10.0317	10.032	1	0	
38	10.7042	10.7045	10.7048	10.7051	10.7054	10.7057	10.706	10.7063	10.7066	10.7069	10.7072	10.7075	10.7078	10.7081	10.7084	10.7087	10.709	10.7093	10.7096	10.7099	10.7102	10.7105	10.7108	10.7111	10.7114	10.7117	10.712	1	0	
39	10	9.99	9.99	9.99	9.98	10.01	9.99	10	10.01	10	10	10	10.01	10.01	10	9.99	10.02	9.99	9.99	10.01	10	10.01	9.99	9.99	10	9.99	10.01	0	1	
40	10.9742	10.9745	10.9748	10.9751	10.9754	10.9757	10.976	10.9763	10.9766	10.9769	10.9772	10.9775	10.9778	10.9781	10.9784	10.9787	10.979	10.97												

6. Встановлюються умови припинення навчання пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання. В якості оцінюючого функціоналу навчання пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання приймається величина похибки E , що повинна дорівнювати або бути меншою 0,05 або 5% (рис. 4.12):

$$E \leq 0,05;$$

або

$$E \leq 5\%.$$

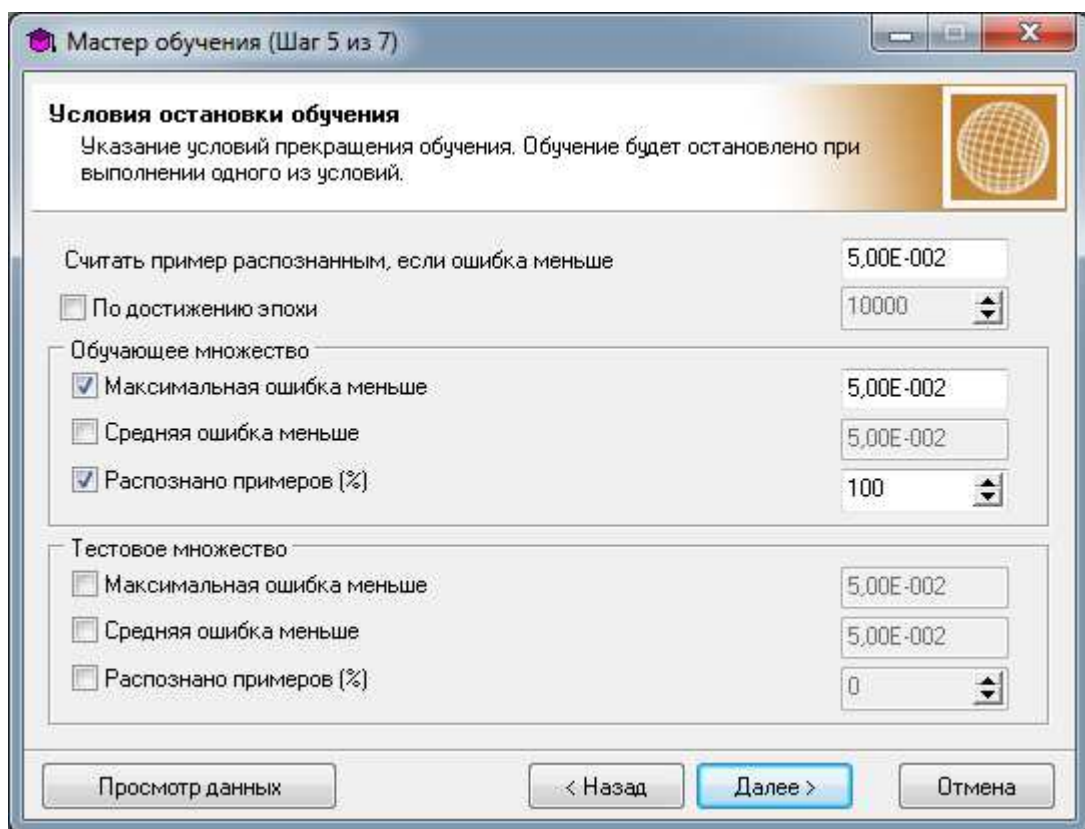


Рис. 4.12. Встановлення умов припинення навчання пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання

7. Для кожного j -го нейрона обчислюється граничне значення функції активації (в даному випадку функцією активації обрано сигмоїду (див. табл.4.2, п. 4.4.1.)), та формується вихідний сигнал OUT_j , що може приймати значення від 0 до 1 та розраховується за виразом:

$$OUT_j = \frac{1}{1 + e^{-NET_{nj}}},$$

де OUT_j – вихідний сигнал j -го штучного нейрону;

NET_{nj} – зважена сума входних сигналів нейронів X_n -го вектору n -го прикладу навчальної множини, $n = (\overline{1, N})$.

8. Для кожного j -го нейрона обчислюється похибка:

$$E_j^k = OUT_j^* - OUT_j,$$

де E_j^k – похибка виходу j -го штучного нейрону;

k – цикл навчання або навчальна епоха, $k = (\overline{1; K})$;

OUT_j^* – бажаний вихідний сигнал j -го штучного нейрону;

OUT_j – фактичний вихідний сигнал j -го штучного нейрону.

9. Перевіряється умова досягнення величини похибки сигналу j -го нейрону на k -му циклі навчання, як деякого оцінюючого функціонала, певного наперед заданого мінімального значення, наприклад, 0,05:

$$E_j^k \leq 0,05;$$

або

$$E_j^k \leq 5\%.$$

10. Відбувається корекція синаптичних ваг w_{ij} штучних нейронів в інтервалі значень від 0 до 1, таким чином, щоб мінімізувати похибку $E_j^k \rightarrow 0,05$:

$$w_{ij} |(t+1) = w_{ij} |(t) + \alpha x_j E_j^k,$$

де $w_{ij} |(t+1)$ – синаптична вага i -го входу j -го нейрону в момент часу $t+1$;

$w_{ij} |(t)$ – синаптична вага i -го входу j -го нейрону в момент часу t ;

α – нормуючий коефіцієнт навчання, початкове значення якого приймається довільним чином в інтервалі значень від 0 до 1 і значення якого змінюється під час навчання у цьому ж інтервалі значень;

x_j – входний сигнал j -го нейрону;

E_j^k – величина похибки j -го нейрону на k -му циклі навчання.

Процес навчання запропонованої ШНМ автоматичного визначення складових

похибок вимірювання повторюється за пунктами 7 – 10, доти поки не виконається умова за пунктом 9, та відображається у вигляді графіку зміни величини похибки за кожну ітерацію (епоху) (рис. 4.13).

Результати навчання запропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання з топологією: 40 вхідних нейронів, 40 прихованих нейронів, 2 вихідних нейронів представлені в табл. 4.9. Тривалість навчання становить 4751 епох протягом 5 хв.

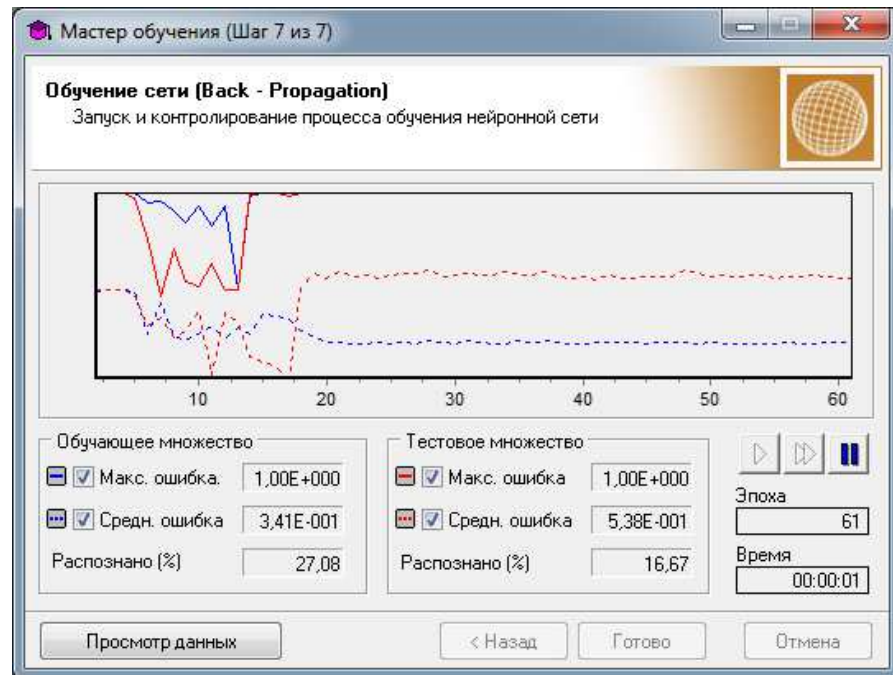


Рис.4.13. Графік зміни величини похибки за кожну ітерацію (епоху) навчання запропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання з наступною топологією: вхідних нейронів – 40, прихованих нейронів – 40, вихідних нейронів – 2

4.5.4. Оптимізація структури штучної нейронної мережі автоматичного визначення складових похибок вимірювання

З метою структурного коригування моделі запропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання, проводяться експериментальні дослідження її роботи із зміною розмірності прихованого шару. Діапазон L зміни кількості нейронів прихованого шару обчислений за формулою (4.4) становить $L = [1; 63]$. Відповідно до вказаного в літературі [28] кількість L

нейронів прихованого шару пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання залежить від числа L_w синаптичних ваг, що обчислюється та евристичною формулою (4.5), і може довільно варіюватись в діапазоні $L_w = [17; 2668]$.

Таким чином, при проведенні експериментальних досліджень моделі пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання, коригування кількості нейронів прихованого шару здійснюється в діапазоні від 1 до 63 нейронів. При цьому варто зазначити, що із літератури [25, 27, 28, 29, 30] відомо, те що будь-яка ШНМ з кількістю нейронів прихованого шару, менше кількості нейронів на вході, дає однозначно неправильні результати при навчанні. Для підтвердження цього проводиться два експерименти з пропонованою ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання із розмірністю прихованого шару меншою 40. Більшою є кількість експериментальних досліджень роботи пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання з розмірністю прихованого шару більше 40.

Отримані результати експериментальних досліджень пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання з різною розмірністю прихованого шару приводяться у зведеній таблиці даних (табл. 4.10 – табл. 4.16). Із приведенного в табл. 4.9 – табл. 4.14 видно, що при малому розмірі прихованого шару, тобто при кількості нейронів прихованого шару менше ніж кількість нейронів на вході, пропонована ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання при навчанні допускає велику кількість помилок. Зокрема пропонована ШНМ-5, з кількістю нейронів прихованого шару 1 дала 55% неправильних відповідей; пропонована ШНМ-6 з кількістю нейронів прихованого шару 15 дала 55% неправильних відповідей.

Графіки зміни величини середньої квадратичної помилки при навчанні пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання в залежності від розмірності прихованого шару для кожного варіанту представлені на рис. 4.14.

Як видно із приведених експериментальних даних (табл. 4.10 – табл. 4.16, рис. 4.14) при кількості нейронів прихованого шару менше кількості нейронів на вході пропонована ШНМ при навчанні допускає значні помилки.

Середня квадратична похибка, %

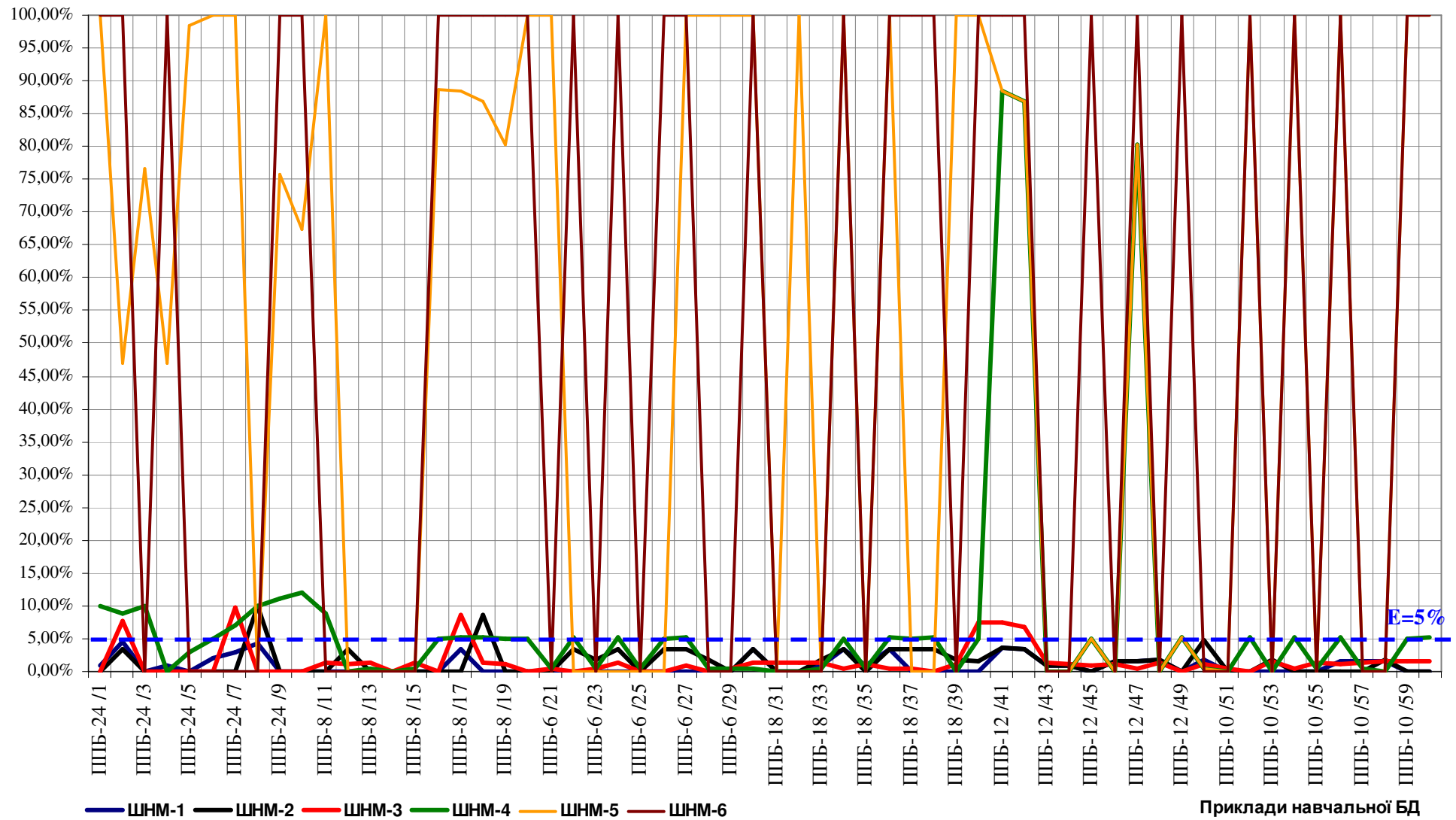


Рис. 4.14. Графіки зміни величини середньої квадратичної похибки в залежності від розмірності прихованого шару пропонуваної ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання

При збільшенні кількості нейронів прихованого шару, по відношенню до кількості нейронів на вході, приблизно на 5, 20 та 23 нейрони величина помилки змінюється не суттєво та не впливає на результати. При цьому час навчання збільшується у 2, 3 та 4 рази відповідно.

Таким чином, результати експериментального дослідження роботи запропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання свідчать, що для вирішення задачі автоматичного визначення складових похибок вимірювання може бути використана ШНМ-1 з параметрами: кількість нейронів на вході – 40, кількість нейронів прихованого шару – 40, 2 нейрони на виході, що навчається за методом навчання з вчителем за алгоритмом зворотного поширення помилки (Back - Propagation).

Інтерпретація результатів експериментального дослідження роботи моделей штучних нейронних мереж автоматизованого визначення складових похибок вимірювання

Результати експериментальних досліджень роботи запропонованих моделей ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання, що представлені у вигляді графіків зміни величини середньої квадратичної похибки E в залежності від розмірності прихованого шару (див. рис. 4.14) можуть бути інтерпретовані наступним чином.

Для автоматичного визначення складових похибок вимірювання досліджувалась робота 6 моделей ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання з різною розмірністю прихованого шару (табл. 4.10). Результати навчання цих моделей ШНМ відповідно до рис. 4.14, табл. 4.10 та табл. 4.11 – табл. 4.16 показали, що при кількості нейронів прихованого шару менше кількості нейронів на вході (для моделей ШНМ-5 та ШНМ-6) при навчанні допускають значні помилки (див. рис. 4.14, табл. 4.13, табл. 4.14). При збільшенні кількості нейронів прихованого шару по відношенню до кількості нейронів на вході приблизно на 5, 20 та 23 нейрони у запропонованих моделях ШНМ-2, ШНМ-3, ШНМ-4, відповідно величина помилки змінюється не суттєво та не впливає на результати (див. рис. 4.14, табл. 4.11 – табл. 4.16). При цьому час навчання збільшується у 2, 3 та 4 рази відповідно (див. табл. 4.10). Приведене вказує на доцільність застосування для автоматичного визначення складових похибок вимірювання ШНМ-1 з параметрами: кількість входів – 40; кількість виходів – 2; розмірність прихованого шару 40 нейронів (див. табл. 4.10).

Таблиця 4.10.

Параметри досліджуваних моделей пропонованої ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання та час їх навчання

№ моделі ШНМ	Параметри досліджуваної моделі ШНМ	Тривалість навчання		Розмір навчальної множини	Параметри ЕОМ на якій поводилось експериментальне дослідження ШНМ
		Кількість ітерацій	Час навчання		
ШНМ-1	вхідних нейронів 40; вихідних нейронів 2; прихованих шарів 1; нейронів прихованого шару 40	4751	5 хв.	60 прикладів	Intel® Pentium ® CPU B970@ 2.3 GHz 2.3 GHz/ DDRII 4Gb
ШНМ-2	вхідних нейронів 40; вихідних нейронів 2; прихованих шарів 1; нейронів прихованого шару 45	9502	10 хв.		
ШНМ-3	вхідних нейронів 40; вихідних нейронів 2; прихованих шарів 1; нейронів прихованого шару 60	14253	15 хв.		
ШНМ-4	вхідних нейронів 40; вихідних нейронів 2; прихованих шарів 1; нейронів прихованого шару 63	19004	20 хв.		
ШНМ-5	вхідних нейронів 40; вихідних нейронів 2; прихованих шарів 1; нейронів прихованого шару 1	861	1 хв.		
ШНМ-6	вхідних нейронів 40; вихідних нейронів 2; прихованих шарів 1; нейронів прихованого шару 15	7861	2 хв.		
Діапазон зміни величини прихованого шару		від 1 до 63 нейронів			

Таблиця 4.11

Зведена таблиця даних за результатами навчання ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання (ШНМ-1 з параметрами: вхідних нейронів **40**; вихідних нейронів **2**; прихованих шарів **1**; кількість нейронів прихованого шару **40**)

Позначення прикладу навчальної множини	Бажані значення виходів Y^*		Фактичні значення виходів Y		Середня квадратична похибка E , %	Примітка
	y^*_1	y^*_2	y_1	y_2		
Тривалість навчання: ітерацій – 4751, час – 5 хв.						
ППБ-24 /1	1	0	0,998	0,002	1,00%	—
ППБ-24 /2	1	0	0,812	0,188	4,50%	—
ППБ-24 /3	0	1	0,023	0,977	0,10%	—
ППБ-24 /4	1	0	1,000	0,000	1,00%	—
ППБ-24 /5	0	1	0,022	0,978	0,10%	—
ППБ-24 /6	0	1	0,000	1,000	2,00%	—
ППБ-24 /7	0	1	0,002	0,998	3,00%	—
ППБ-24 /8	0	1	0,000	1,000	4,30%	—
ППБ-24 /9	1	0	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-24 /10	1	0	0,990	0,010	0,00%	—
ППБ-8 /11	0	1	0,022	0,978	0,10%	—
ППБ-8 /12	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-8 /13	0	1	0,002	0,998	0,00%	—
ППБ-8 /14	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-8 /15	0	1	0,023	0,977	0,10%	—
ППБ-8 /16	1	0	0,998	0,002	0,00%	—
ППБ-8 /17	1	0	0,812	0,188	3,50%	—
ППБ-8 /18	1	0	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-8 /19	1	0	0,990	0,010	0,00%	—
ППБ-8 /20	1	0	0,998	0,002	0,00%	—
ППБ-6 /21	0	1	0,023	0,977	0,10%	—

Продовження табл. 4.11

Позначення прикладу навчальної множини	Бажані значення виходів Y^*		Фактичні значення виходів Y		Середня квадратична похибка E , %	Примітка
	y_1^*	y_2^*	y_1	y_2		
ППБ-6 /22	1	0	1,000	0,000	0,00%	—
ППБ-6 /23	0	1	0,023	0,977	0,10%	—
ППБ-6 /24	1	0	1,000	0,000	0,00%	—
ППБ-6 /25	0	1	0,022	0,978	0,10%	—
ППБ-6 /26	1	0	0,998	0,002	0,00%	—
ППБ-6 /27	1	0	0,998	0,002	0,00%	—
ППБ-6 /28	0	1	0,023	0,977	0,10%	—
ППБ-6 /29	0	1	0,023	0,977	0,10%	—
ППБ-6 /30	1	0	0,812	0,188	3,50%	—
ППБ-18 /31	0	1	0,023	0,977	0,10%	—
ППБ-18 /32	0	1	0,022	0,978	0,10%	—
ППБ-18 /33	0	1	0,102	0,898	1,00%	—
ППБ-18 /34	1	0	0,812	0,188	3,50%	—
ППБ-18 /35	0	1	0,102	0,898	1,00%	—
ППБ-18 /36	1	0	0,812	0,188	3,50%	—
ППБ-18 /37	1	0	0,998	0,002	0,00%	—
ППБ-18 /38	1	0	0,998	0,002	0,00%	—
ППБ-18 /39	0	1	0,023	0,977	0,10%	—
ППБ-18 /40	1	0	0,998	0,002	0,00%	—
ППБ-12 /41	1	0	0,811	0,189	3,60%	—
ППБ-12 /42	1	0	0,814	0,186	3,50%	—
ППБ-12 /43	0	1	0,102	0,898	1,00%	—
ППБ-12 /44	0	1	0,088	0,912	0,80%	—
ППБ-12 /45	1	0	0,969	0,031	0,10%	—

Закінчення табл. 4.11

Позначення прикладу навчальної множини	Бажані значення виходів ШНМ Y		Фактичні значення виходів ШНМ Y		Середня квадратична похибка E , %	Примітка
	y_1	y_2	y_1	y_2		
ППБ-12 /46	0	1	0,123	0,877	1,50%	—
ППБ-12 /47	1	0	0,874	0,126	1,60%	—
ППБ-12 /48	0	1	0,134	0,866	1,80%	—
ППБ-12 /49	1	0	0,965	0,035	0,10%	—
ППБ-12 /50	0	1	0,134	0,866	1,80%	—
ППБ-10 /51	0	1	0,023	0,977	0,10%	—
ППБ-10 /52	1	0	1,000	0,000	0,00%	—
ППБ-10 /53	0	1	0,023	0,977	0,10%	—
ППБ-10 /54	1	0	1,000	0,000	0,00%	—
ППБ-10 /55	0	1	0,031	0,969	0,10%	—
ППБ-10 /56	1	0	0,877	0,123	1,50%	—
ППБ-10 /57	0	1	0,123	0,877	1,50%	—
ППБ-10 /58	0	1	0,123	0,877	1,50%	—
ППБ-10 /59	1	0	0,977	0,023	0,10%	—
ППБ-10 /60	1	0	0,977	0,023	0,10%	—

Таблиця 4.12

Зведена таблиця даних за результатами навчання ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання (ШНМ-2 з параметрами: вхідних нейронів **40**; вихідних нейронів **2**; прихованих шарів **1**; кількість нейронів прихованого шару **45**)

Позначення прикладу навчальної множини	Бажані значення виходів Y^*		Фактичні значення виходів Y		Середня квадратична похибка E , %	Примітка
	y_1^*	y_2^*	y_1	y_2		
Тривалість навчання: 9502 ітерацій, час 10 хв.						
ППБ-24 /1	1	0	0,978	0,002	0,00%	—
ППБ-24 /2	1	0	0,852	0,188	3,50%	—
ППБ-24 /3	0	1	0,023	0,977	0,10%	—
ППБ-24 /4	1	0	1,000	0,000	0,00%	—
ППБ-24 /5	0	1	0,022	0,978	0,10%	—
ППБ-24 /6	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-24 /7	0	1	0,002	0,998	0,00%	—
ППБ-24 /8	0	1	1,000	0,000	10,00%	Велика похибка
ППБ-24 /9	1	0	1,000	0,000	0,00%	—
ППБ-24 /10	1	0	0,990	0,010	0,00%	—
ППБ-8 /11	0	1	0,002	0,978	0,00%	—
ППБ-8 /12	0	1	0,188	0,852	3,50%	—
ППБ-8 /13	0	1	0,023	0,977	0,10%	—
ППБ-8 /14	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-8 /15	0	1	0,022	0,978	0,10%	—
ППБ-8 /16	1	0	1,000	0,000	0,00%	—
ППБ-8 /17	1	0	0,998	0,002	0,00%	—
ППБ-8 /18	1	0	0,000	0,998	8,70%	Велика похибка
ППБ-8 /19	1	0	1,000	0,000	0,00%	—
ППБ-8 /20	1	0	0,990	0,010	0,10%	—
ППБ-6 /21	0	1	0,022	0,978	0,10%	—

Продовження табл. 4.12

Позначення прикладу навчальної множини	Бажані значення виходів Y^*		Фактичні значення виходів Y		Середня квадратична похибка E , %	Примітка
	y_1^*	y_2^*	y_1	y_2		
ППБ-6 /22	1	0	0,852	0,188	3,50%	—
ППБ-6 /23	0	1	0,134	0,866	1,80%	—
ППБ-6 /24	1	0	0,852	0,188	3,50%	—
ППБ-6 /25	0	1	0,023	0,977	0,10%	—
ППБ-6 /26	1	0	0,852	0,188	3,50%	—
ППБ-6 /27	1	0	0,852	0,188	3,50%	—
ППБ-6 /28	0	1	0,134	0,866	1,80%	—
ППБ-6 /29	0	1	0,023	0,977	0,10%	—
ППБ-6 /30	1	0	0,852	0,188	3,50%	—
ППБ-18 /31	0	1	0,023	0,977	0,10%	—
ППБ-18 /32	0	1	0,023	0,977	0,10%	—
ППБ-18 /33	0	1	0,134	0,866	1,80%	—
ППБ-18 /34	1	0	0,852	0,188	3,50%	—
ППБ-18 /35	0	1	0,023	0,977	0,10%	—
ППБ-18 /36	1	0	0,852	0,188	3,50%	—
ППБ-18 /37	1	0	0,852	0,188	3,50%	—
ППБ-18 /38	1	0	0,852	0,188	3,50%	—
ППБ-18 /39	0	1	0,134	0,866	1,80%	—
ППБ-18 /40	1	0	0,874	0,126	1,60%	—
ППБ-12 /41	1	0	0,811	0,189	3,60%	—
ППБ-12 /42	1	0	0,814	0,186	3,50%	—
ППБ-12 /43	0	1	0,102	0,898	1,00%	—
ППБ-12 /44	0	1	0,088	0,912	0,80%	—
ППБ-12 /45	1	0	0,969	0,031	0,10%	—

Закінчення табл. 4.12

Позначення прикладу навчальної множини	Бажані значення виходів Y^*		Фактичні значення виходів Y		Середня квадратична похибка E , %	Примітка
	y_1^*	y_2^*				
ППБ-12 /46	0	1	0,123	0,877	1,50%	—
ППБ-12 /47	1	0	0,874	0,126	1,60%	—
ППБ-12 /48	0	1	0,134	0,866	1,80%	—
ППБ-12 /49	1	0	0,965	0,035	0,10%	—
ППБ-12 /50	0	1	0,586	0,814	4,70%	—
ППБ-10 /51	0	1	0,023	0,977	0,10%	—
ППБ-10 /52	1	0	0,969	0,031	0,10%	—
ППБ-10 /53	0	1	0,134	0,866	1,80%	—
ППБ-10 /54	1	0	0,969	0,031	0,10%	—
ППБ-10 /55	0	1	0,023	0,977	0,10%	—
ППБ-10 /56	1	0	0,969	0,031	0,10%	—
ППБ-10 /57	0	1	0,023	0,977	0,10%	—
ППБ-10 /58	0	1	0,134	0,866	1,80%	—
ППБ-10 /59	1	0	0,969	0,031	0,10%	—
ППБ-10 /60	1	0	0,969	0,031	0,10%	—

Таблиця 4.13

Зведена таблиця даних за результатами навчання ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання (ШНМ-3 з параметрами: вхідних нейронів 40; вихідних нейронів 2; прихованих шарів 1; кількість нейронів прихованого шару 60)

Позначення прикладу навчальної множини	Бажані значення виходів Y		Фактичні значення виходів Y		Середня квадратична похибка E , %	Примітка
	y_1	y_2	y_1	y_2		
Тривалість навчання: ітерацій – 14253, час – 15 хв.						
ППБ-24 /1	1	0	0,999	0,001	0,00%	—
ППБ-24 /2	1	0	0,625	0,375	7,60%	Велика похибка
ППБ-24 /3	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-24 /4	1	0	0,999	0,001	0,00%	—
ППБ-24 /5	0	1	0,001	0,999	0,00%	—
ППБ-24 /6	0	1	0,001	0,999	0,00%	—
ППБ-24 /7	0	1	0,348	0,75	9,80%	Велика похибка
ППБ-24 /8	0	1	0,001	0,999	0,00%	—
ППБ-24 /9	1	0	1,000	0,000	0,00%	—
ППБ-24 /10	1	0	1,000	0,000	0,00%	—
ППБ-8 /11	0	1	0,119	0,881	1,40%	—
ППБ-8 /12	0	1	0,109	0,891	1,20%	—
ППБ-8 /13	0	1	0,119	0,881	1,40%	—
ППБ-8 /14	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-8 /15	0	1	0,119	0,881	1,40%	—
ППБ-8 /16	1	0	0,999	0,001	0,00%	—
ППБ-8 /17	1	0	0,725	0,575	8,60%	Велика похибка
ППБ-8 /18	1	0	0,881	0,119	1,40%	—
ППБ-8 /19	1	0	0,891	0,109	1,20%	—
ППБ-8 /20	1	0	1,000	0,000	0,00%	—
ППБ-6 /21	0	1	0,064	0,936	0,40%	—

Продовження табл. 4.13

Позначення прикладу навчальної множини	Бажані значення виходів Y^*		Фактичні значення виходів Y		Середня квадратична похибка E , %	Примітка
	y_1^*	y_2^*	y_1	y_2		
ППБ-6 /22	1	0	1,000	0,000	0,00%	—
ППБ-6 /23	0	1	0,064	0,936	0,40%	—
ППБ-6 /24	1	0	0,881	0,119	1,40%	—
ППБ-6 /25	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-6 /26	1	0	0,999	0,001	0,00%	—
ППБ-6 /27	1	0	0,904	0,096	0,90%	—
ППБ-6 /28	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-6 /29	0	1	0,064	0,936	0,40%	—
ППБ-6 /30	1	0	0,881	0,119	1,40%	—
ППБ-18 /31	0	1	0,119	0,881	1,40%	—
ППБ-18 /32	0	1	0,119	0,881	1,40%	—
ППБ-18 /33	0	1	0,119	0,881	1,40%	—
ППБ-18 /34	1	0	0,936	0,064	0,40%	—
ППБ-18 /35	0	1	0,111	0,889	1,20%	—
ППБ-18 /36	1	0	0,936	0,064	0,40%	—
ППБ-18 /37	1	0	0,936	0,064	0,40%	—
ППБ-18 /38	1	0	1,000	0,000	0,00%	—
ППБ-18 /39	0	1	0,111	0,889	1,20%	—
ППБ-18 /40	1	0	1,000	0,000	7,50%	—
ППБ-12 /41	1	0	0,130	0,870	7,50%	Велика похибка
ППБ-12 /42	1	0	0,180	0,820	6,70%	Велика похибка
ППБ-12 /43	0	1	0,119	0,881	1,40%	—
ППБ-12 /44	0	1	0,109	0,891	1,20%	—
ППБ-12 /45	1	0	0,904	0,096	0,90%	—

Закінчення табл. 4.13

Позначення прикладу навчальної множини	Бажані значення виходів ШНМ Y		Фактичні значення виходів ШНМ Y		Середня квадратична похибка E , %	Примітка
	y_1	y_2	y_1	y_2		
ППБ-12 /46	0	1	0,110	0,890	1,20%	—
ППБ-12 /47	1	0	0,936	0,064	0,40%	—
ППБ-12 /48	0	1	0,119	0,881	1,40%	—
ППБ-12 /49	1	0	1,000	0,000	0,00%	—
ППБ-12 /50	0	1	0,111	0,889	1,20%	—
ППБ-10 /51	0	1	0,064	0,936	0,40%	—
ППБ-10 /52	1	0	0,999	0,001	0,00%	—
ППБ-10 /53	0	1	0,125	0,875	1,70%	—
ППБ-10 /54	1	0	0,936	0,064	0,40%	—
ППБ-10 /55	0	1	0,119	0,881	1,40%	—
ППБ-10 /56	1	0	0,890	0,110	1,20%	—
ППБ-10 /57	0	1	0,119	0,881	1,40%	—
ППБ-10 /58	0	1	0,123	0,877	1,50%	—
ППБ-10 /59	1	0	0,874	0,126	1,60%	—
ППБ-10 /60	1	0	0,874	0,126	1,60%	—

Таблиця 4.14

Зведена таблиця даних за результатами навчання ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання (ШНМ-4 з параметрами: вхідних нейронів **40**; вихідних нейронів **2**; прихованих шарів **1**; кількість нейронів прихованого шару **63**)

Позначення прикладу навчальної множини	Бажані значення виходів Y^*		Фактичні значення виходів Y		Середня квадратична похибка E , %	Примітка
	y_1^*	y_2^*	y_1	y_2		
Тривалість навчання: 19004 ітерацій, 20 хв.						
ППБ-24 /1	1	0	0,991	0,009	10,00%	—
ППБ-24 /2	1	0	0,658	0,442	8,80 %	Велика похибка
ППБ-24 /3	0	1	0,110	0,990	10,00%	—
ППБ-24 /4	1	0	0,974	0,026	0,10%	—
ППБ-24 /5	0	1	0,313	0,986	3,00%	—
ППБ-24 /6	0	1	0,400	1,000	5,00%	—
ППБ-24 /7	0	1	0,404	0,996	7,00 %	Велика похибка
ППБ-24 /8	0	1	0,306	0,994	10,00 %	Велика похибка
ППБ-24 /9	1	0	0,991	0,409	11,00 %	Велика похибка
ППБ-24 /10	1	0	0,987	0,313	12,00 %	Велика похибка
ППБ-8 /11	0	1	0,363	0,937	8,80 %	Велика похибка
ППБ-8 /12	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-8 /13	0	1	0,063	0,937	0,40%	—
ППБ-8 /14	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-8 /15	0	1	0,063	0,937	0,40%	—
ППБ-8 /16	1	0	0,779	0,221	4,90%	—
ППБ-8 /17	1	0	0,771	0,232	5,30%	—
ППБ-8 /18	1	0	0,771	0,232	5,30%	—
ППБ-8 /19	1	0	0,779	0,221	4,90%	—
ППБ-8 /20	1	0	0,779	0,221	4,90%	—
ППБ-6 /21	0	1	0,063	0,937	0,40%	—

Продовження табл. 4.14

Позначення прикладу навчальної множини	Бажані значення виходів Y^*		Фактичні значення виходів Y		Середня квадратична похибка E , %	Примітка
	y_1^*	y_2^*	y_1	y_2		
ППБ-6 /22	1	0	0,771	0,232	5,30%	—
ППБ-6 /23	0	1	0,063	0,937	0,40%	—
ППБ-6 /24	1	0	0,771	0,232	5,30%	—
ППБ-6 /25	0	1	0,063	0,937	0,40%	—
ППБ-6 /26	1	0	0,779	0,221	4,90%	—
ППБ-6 /27	1	0	0,771	0,232	5,30%	—
ППБ-6 /28	0	1	0,063	0,937	0,40%	—
ППБ-6 /29	0	1	0,063	0,937	0,40%	—
ППБ-6 /30	1	0	0,063	0,937	0,40%	—
ППБ-18 /31	0	1	0,004	0,996	0,00%	—
ППБ-18 /32	0	1	0,002	0,998	0,00%	—
ППБ-18 /33	0	1	0,063	0,937	0,40%	—
ППБ-18 /34	1	0	0,779	0,221	4,90%	—
ППБ-18 /35	0	1	0,063	0,937	0,40%	—
ППБ-18 /36	1	0	0,771	0,232	5,30%	—
ППБ-18 /37	1	0	0,779	0,221	4,90%	—
ППБ-18 /38	1	0	0,771	0,232	5,30%	—
ППБ-18 /39	0	1	0,018	0,982	0,00%	—
ППБ-18 /40	1	0	0,779	0,221	4,90%	—
ППБ-12 /41	1	0	0,060	0,940	88,40%	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-12 /42	1	0	0,068	0,932	86,80%	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-12 /43	0	1	0,004	0,996	0,00%	—
ППБ-12 /44	0	1	0,002	0,998	0,00%	—
ППБ-12 /45	1	0	0,779	0,221	4,90%	—

Закінчення табл. 4.14

Позначення прикладу навчальної множини	Бажані значення виходів ШНМ Y		Фактичні значення виходів ШНМ Y		Середня квадратична похибка E , %	Примітка
	y_1	y_2	y_1	y_2		
ППБ-12 /46	0	1	0,018	0,982	0,0%	—
ППБ-12 /47	1	0	0,104	0,895	80,2%	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-12 /48	0	1	0,030	0,970	0,1%	—
ППБ-12 /49	1	0	0,771	0,232	5,3%	—
ППБ-12 /50	0	1	0,063	0,937	0,4%	—
ППБ-10 /51	0	1	0,030	0,970	0,1%	—
ППБ-10 /52	1	0	0,771	0,232	5,3%	—
ППБ-10 /53	0	1	0,030	0,970	0,1%	—
ППБ-10 /54	1	0	0,771	0,232	5,3%	—
ППБ-10 /55	0	1	0,063	0,937	0,4%	—
ППБ-10 /56	1	0	0,771	0,232	5,3%	—
ППБ-10 /57	0	1	0,063	0,937	0,4%	—
ППБ-10 /58	0	1	0,030	0,970	0,1%	—
ППБ-10 /59	1	0	0,779	0,221	4,9%	—
ППБ-10 /60	1	0	0,771	0,232	5,3%	—

Таблиця 4.15

Зведена таблиця даних за результатами навчання ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання (ШНМ-5 з параметрами: входних нейронів 40; вихідних нейронів 2; прихованих шарів 1; кількість нейронів прихованого шару 1)

Позначення прикладу навчальної множини	Бажані значення виходів Y^*		Фактичні значення виходів Y		Середня квадратична похибка E , %	Примітка
	y_1^*	y_2^*	y_1	y_2		
Тривалість навчання: 861 ітерацій, 1 хв.						
ППБ-24 /1	1	0	0,000	1,000	100,0%	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-24 /2	1	0	0,314	0,686	47,0%	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-24 /3	0	1	0,875	0,125	76,6%	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-24 /4	1	0	0,314	0,686	47,0%	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-24 /5	0	1	0,991	0,009	98,3%	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-24 /6	0	1	1,000	0,000	100,00%	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-24 /7	0	1	1,000	0,000	100,00%	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-24 /8	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-24 /9	1	0	0,130	0,870	75,7%	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-24 /10	1	0	0,180	0,820	67,3%	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-8 /11	0	1	1,000	0,000	100,00%	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-8 /12	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-8 /13	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-8 /14	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-8 /15	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-8 /16	1	0	0,058	0,942	88,7%	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-8 /17	1	0	0,060	0,940	88,4%	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-8 /18	1	0	0,068	0,932	86,8%	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-8 /19	1	0	0,104	0,895	80,2%	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-8 /20	1	0	0,000	1,000	100,00%	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-6 /21	0	1	1,000	0,000	100,00%	Відповідь ШНМ невірна

Продовження табл. 4.15

Позначення прикладу навчальної множини	Бажані значення виходів Y^*		Фактичні значення виходів Y		Середня квадратична похибка E , %	Примітка
	y_1^*	y_2^*	y_1	y_2		
ППБ-6 /22	1	0	1,000	0,000	0,00%	—
ППБ-6 /23	0	1	1,000	0,000	0,00%	—
ППБ-6 /24	1	0	1,000	0,000	0,00%	—
ППБ-6 /25	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-6 /26	1	0	1,000	0,000	0,00%	—
ППБ-6 /27	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-6 /28	0	1	1,000	0,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-6 /29	0	1	1,000	0,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-6 /30	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-18 /31	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-18 /32	0	1	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-18 /33	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-18 /34	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-18 /35	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-18 /36	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-18 /37	1	0	1,000	0,000	0,00%	—
ППБ-18 /38	1	0	1,000	0,000	0,00%	—
ППБ-18 /39	0	1	1,000	0,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-18 /40	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-12 /41	1	0	0,060	0,940	88,4 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-12 /42	1	0	0,068	0,932	86,8 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-12 /43	0	1	0,004	0,996	0,0%	—
ППБ-12 /44	0	1	0,002	0,998	0,0%	—
ППБ-12 /45	1	0	0,779	0,221	4,9%	—

Закінчення табл. 4.15

Позначення прикладу навчальної множини	Бажані значення виходів ШНМ Y'		Фактичні значення виходів ШНМ Y		Середня квадратична похибка E , %	Примітка
	y'_1	y'_2	y_1	y_2		
ППБ-12 /46	0	1	0,018	0,982	0,0%	—
ППБ-12 /47	1	0	0,104	0,895	80,2 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-12 /48	0	1	0,030	0,970	0,1%	—
ППБ-12 /49	1	0	0,771	0,232	5,3%	—
ППБ-12 /50	0	1	0,063	0,937	0,4%	—
ППБ-10 /51	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-10 /52	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-10 /53	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-10 /54	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-10 /55	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-10 /56	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-10 /57	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-10 /58	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-10 /59	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-10 /60	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна

Таблиця 4.16

Зведена таблиця даних за результатами навчання ШНМ автоматичного визначення складових похибок вимірювання (ШНМ-6 з параметрами: вхідних нейронів **40**; вихідних нейронів **2**; прихованих шарів **1**; кількість нейронів прихованого шару **15**)

Позначення прикладу навчальної множини	Бажані значення виходів Y		Фактичні значення виходів Y		Середня квадратична похибка E , %	Примітка
	y_1	y_2	y_1	y_2		
Тривалість навчання: 7861 ітерацій, 2 хв.						
ППБ-24 /1	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-24 /2	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-24 /3	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-24 /4	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-24 /5	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-24 /6	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-24 /7	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-24 /8	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-24 /9	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-24 /10	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-8 /11	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-8 /12	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-8 /13	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-8 /14	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-8 /15	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-8 /16	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-8 /17	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-8 /18	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-8 /19	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-8 /20	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-6 /21	0	1	0,000	1,000	0,00%	—

Закінчення табл. 4.16

Позначення прикладу навчальної множини	Бажані значення виходів Y^*		Фактичні значення виходів Y		Середня квадратична похибка E , %	Примітка
	y_1^*	y_2^*	y_1	y_2		
ППБ-6 /22	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-6 /23	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-6 /24	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-6 /25	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-6 /26	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-6 /27	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-6 /28	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-6 /29	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-6 /30	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-18 /31	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-18 /32	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-18 /33	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-18 /34	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-18 /35	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-18 /36	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-18 /37	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-18 /38	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-18 /39	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-18 /40	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-12 /41	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-12 /42	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-12 /43	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-12 /44	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-12 /45	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна

Закінчення табл. 4.16

Позначення прикладу навчальної множини	Бажані значення виходів ШНМ Y		Фактичні значення виходів ШНМ Y		Середня квадратична похибка E , %	Примітка
	y_1	y_2	y_1	y_2		
ППБ-12 /46	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-12 /47	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-12 /48	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-12 /49	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-12 /50	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-10 /51	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-10 /52	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-10 /53	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-10 /54	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-10 /55	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-10 /56	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-10 /57	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-10 /58	0	1	0,000	1,000	0,00%	—
ППБ-10 /59	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна
ППБ-10 /60	1	0	0,000	1,000	100,00 %	Відповідь ШНМ невірна

4.6. Розробка штучної нейронної мережі автоматичного розпізнавання хімічних елементів для визначення їх вмісту у складі металовмісних матеріалів

Використання КМОП-матриці у складі ППСВК дозволяє розширити функціональні можливості та виконувати аналіз спектрального розподілу хімічних речовин металовмісних матеріалів. Прилади, що працюють на цій основі називаються спектрогоніометри. Останні широко застосовуються для визначення характеристик різних об'єктів, в тому числі для вимірювання їх коефіцієнта відбиття [41], а також вимірювання оптичних характеристик речовин [42].



В літературі [43, 44] приводяться результати визначення тяжких металів у зразках ґрунту [43] та металах [44] методом лазерної спектроскопії. Порівняння отриманих результатів з результатами, що були одержані традиційним хімічним способом підтвердили високу точність лазерної спектроскопії та відповідно лазерних оптичних приладів. В статті [44] вказано, що лазерна спектроскопія – це метод, який може забезпечити якісні та кількісні вимірювання характеристик опромінених металів. В роботі [44] автори розраховували параметри плазми, що була отримана із зразка латунного сплаву під дією імпульсного Nd: YAG-лазера. Нажаль автори не вказують час, що був витрачений вимірювальною системою на визначення хімічних елементів. За інформацією наведеною в статті, можна стверджувати, що він був порівняно тривалим.

В літературі [45] приводиться опис підходу до проведення вимірювання хімічного складу аерозольної речовини в режимі реального часу з використанням плазменої спектроскопії та широкосмугового спектрометра с діапазоном довжини хвиль 200 – 980 нм. Час затримки одного датчика 1,3 μ s. Проте недоліком є неможливість визначити наявність таких хімічних елементів як Cd, Cr, Cu, Mn, Na та Ti. При цьому час вибірки складав 5 хв. Вказане вище дозволяє стверджувати, що використання спектрогоніометрів є досить широким особливо при визначенні хімічного складу різних матеріалів.



Проте аналіз (табл. 4.17) відомих промислових зразків дає підстави стверджувати, що всі вони мають ряд суттєвих недоліків, які обмежують їх функціональні можливості

Таблиця 4.17

Спектрометри та вимірювальні комплекси і системи на їх основі, що складають сучасну спектрометричну базу

Модель	Основні технічні та метрологічні параметри, переваги та недоліки	Опис	Виробник
<p>Оптико-емісійний спектрометр ARL 4460 [46]</p> 	<p>Похибка установки довжини хвилі, нм. $\pm 1,5$; Робочий спектральний діапазон, нм. – 325-1000; Система управління містить спеціалізоване ПЗ OXSAS. Переваги: можливість автоматизованої обробки інформації. Недоліки: складні математичні моделі та алгоритми обробки інформації.</p>	<p>Аналіз металів і сплавів з різними основами (Fe, Al, Ni, Ti, Cu, Zn, Co, Mg, Pb, Sn, Ag, Au, Pt, Pd)</p>	<p>США, Thermo Fisher Scientific [46]</p>
<p>Емісійний спектрометр “Іскролайн 100” [47]</p> 	<p>Відносна випадкова похибка, % – $0,5 \div 40$; Робочий спектральний діапазон, нм. – 174 – 441; Система управління містить комп'ютер, контролер і спеціалізоване ПЗ, що суміщається з Windows98 / 2000 / XP / 7. Переваги: можливість автоматизованої обробки інформації. Недоліки: порівняно висока випадкова похибка (40%), невідома величина систематичної похибки, неможливість обробки інформації в режимі реального часу, залежність результатів вимірювання від якості державних стандартних зразків, складні математичні моделі та алгоритми обробки інформації.</p>	<p>Настільний спектрометр для спектрального аналізу металів і сплавів з різними основами (Fe, Al, Cu, Zn, Pb, Sn, Sb, Ni, Ti, Co, Mg)</p>	<p>РФ, компанія “Іскролайн” [47]</p>

Закінчення табл. 4.17

<p>Атомно-емісійний спектрометр “ІСКРОЛАЙН 300” [47]</p> 	<p>Відносна випадкова похибка (в залежності від елемента, значення масової частки), % – $0,5 \div 40$;</p> <p>Робочий спектральний діапазон, нм. – $174 - 960$;</p> <p>Система управління містить комп'ютер, контролер і спеціалізоване програмне забезпечення, що суміщається з ОС Windows98 / 2000 / XP / 7.</p> <p>Переваги: можливість автоматизованої обробки інформації.</p> <p>Недоліки: порівняно висока випадкова похибка (40 %), невідома величина систематичної похибки, неможливість обробки інформації в режимі реального часу, залежність результатів вимірювання від якості державних стандартних зразків, невідомі показники надійності, невідомі принципи роботи програмного забезпечення та алгоритми обробки інформації.</p>	<p>Спектрометр для спектрального аналізу металів і сплавів з різними основами (Fe, Al, Cu, Zn, Pb, Sn, Sb, Ni, Ti, Co, Mg) в лабораторних умовах.</p>	<p>РФ, компанія “Іскролайн” [47]</p>
<p>Спектрофотометр ULAB 102 [48]</p> 	<p>Похибка установки довжини хвилі, нм. – $\pm 1,5$;</p> <p>Робочий спектральний діапазон, нм. – $325 - 1000$;</p> <p>Система управління містить спеціалізоване програмне забезпечення не сумісне з Windows.</p> <p>Переваги: можливість автоматизованої обробки інформації.</p> <p>Недоліки: невідома величина випадкової похибки, невідомі показники надійності, невідомі принципи роботи програмного забезпечення та алгоритми обробки інформації.</p>	<p>Спектрометр для вимірювання коефіцієнта пропускання, оптичної щільності досліджуваних твердих проб та обчислення оптичної щільності</p>	<p>Китай, компанія Ulab [48]</p>

Підсумовуючи вказане можна дійти висновку, що проблема якісного та кількісного визначення хімічних елементів у металах в режимі реального часу ще й досі повністю не вирішена. Це обумовлюється тим, що сучасне

виробництво у відповідності до міжнародних стандартів якості, постійно висуває все більш жорсткі вимоги до ефективності функціонування вимірювальних приладів. З врахуванням того, що одними із показників ефективності функціонування вимірювальних систем є безпечність здоров'ю людей та навколишнього середовища, точність, висока швидкодія, універсальність, робота в автоматизованому режимі та режимі реального часу, то забезпечити вказане, при розробці нових та вдосконаленні відомих приладів, можна за рахунок використання високоякісних оптичних систем, прецизійних сенсорів, а також новітніх алгоритмів, методів і процедур обробки інформації, зокрема застосування ШНМ.

4.6.1. Побудова структури штучної нейронної мережі автоматичного розпізнавання хімічних елементів

Пропонована ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів дозволяє автоматично визначати наявність певних хімічних елементів у складі досліджуваного ОВ за цифровими сигналами від КМОП-матриці.

Пропонована ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів виконує операцію розпізнавання хімічних елементів за їх спектральним розподілом, що формується на поверхні КМОП-матриці. Для цього необхідно провести її попереднє навчання за способом “навчання з вчителем” та алгоритмом *back propagation*. Вхідні сигнали пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів змістовно відображають інтенсивність відбитого світлового випромінювання, що залежить від хімічного складу металів. При цьому передбачається навчання пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів на основі відомих значень інтенсивності спектральних ліній (отриманих експериментально) та основних законів фізики хімічних елементів металів, для визначення їх наявності у металовмісних матеріалах.

Пропонована ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів за відповідним алгоритмом роботи обробляє цифрові сигнали від КМОП-матриці. На вхід пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних

елементів подається множина струмів насичення фотоелементів КМОП-матриці при опроміненні їх світлом із довжинами хвиль λ_i : $\{i_i(\lambda_i) \mid i \in \{C, P, S, Mn, Si, Cr, Ni, Cu, Nb, N, Al, Ti, V, Mo, W, Co, B, Fe, \dots\}\}$, де C, P, S, Mn, Si, Cr, Ni, Cu, Nb, N, Al, Ti, V, Mo, W, Co, B, Fe – умовне позначення деяких елементів, що можуть міститись у матеріалі ОВ. Множина струмів насичення, відповідно до вимог технології ШНМ, формує вхідний вектор $X = \{x_j \mid j = \overline{1; J}\}$, що подається на входи пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів (рис. 4.15, рис. 4.16). Розмірність вхідного вектору та кількість нейронів на вході пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів, що призначені для приймання вхідної інформації від КМОП-матриці, обумовлюється роздільною здатністю останньої.

В результаті роботи пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів формується цифровий сигнал, що відображає хімічний склад досліджуваного ОВ у вигляді вектора Y цифрових сигналів: $Y = \{y_m \mid m = \overline{1; M}\}$, де M – кількість хімічних елементів, що можуть бути визначені. Максимальне значення y_m на m -му відповідному виході ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів відповідає наявності у складі ОВ певного хімічного елемента (рис. 4.15, рис. 4.16).

Схематична модель пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів приведена на рис. 4.15. Пропонована ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів у металовмісних матеріалах організована як багатошаровий перцептрон з 3-шаровою структурою, кількість нейронів кожного шару обумовлено умовами задачі.

Кількість нейронів на виході пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів обумовлюється структурою вихідного вектору Y . Рішення про наявність того чи іншого хімічного елемента у металі приймається так званим інтерпретатором відповіді „переможець отримує все”, в якому кількість вихідних сигналів відповідає кількості варіантів відповіді, а номер відповіді відповідає номеру нейрона, що видав максимальний сигнал на виході. Тобто при визначенні хімічного складу металовмісного матеріалу, на відповідних виходах пропонованої ШНМ будуть отримані максимальні значення сигналів, що

відповідають наявності відповідних хімічних елементів. У “прихованому” шарі здійснюється проміжна обробка інформації таким чином, що на вихідний шар нейронів подаються лінійно-розділені множини. Розмірність прихованого шару визначається емпірично за результатами навчання пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів у металовмісних матеріалах. В якості оцінюючого функціоналу навчання пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів у металовмісних матеріалах прийнято величину похибки E , що не повинна перевищувати 0,05 або 5%.

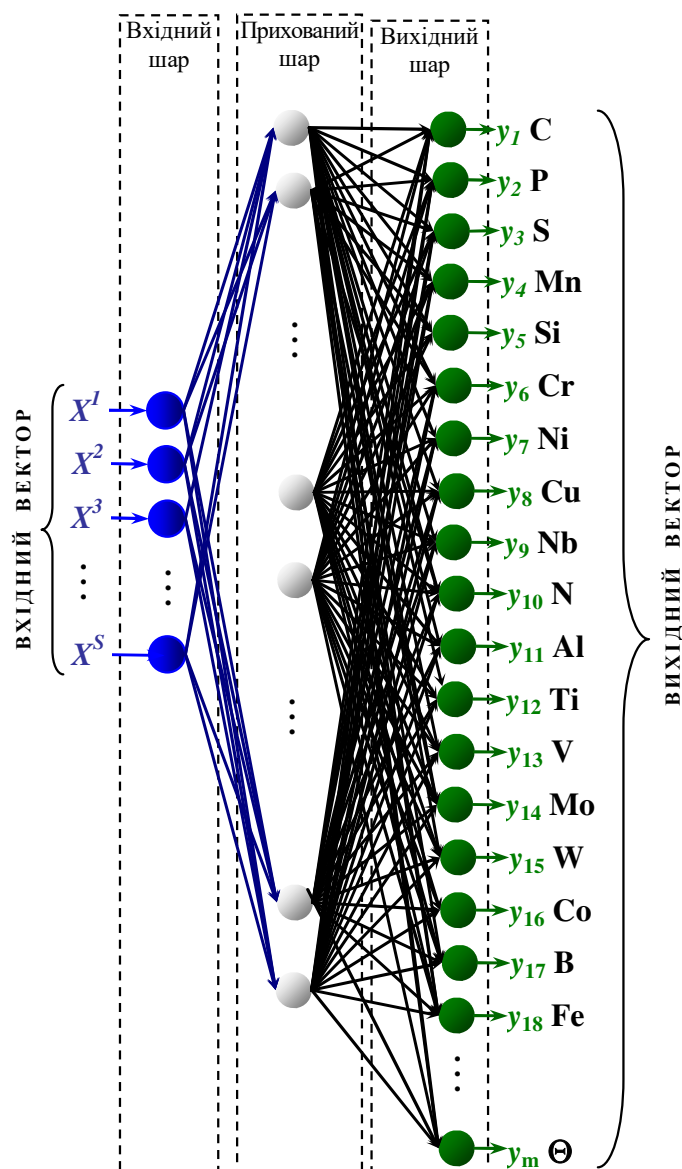


Рис. 4.15. Схематична модель пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів у металовмісних матеріалах

Принципи функціональної взаємодії пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів у металовмісних матеріалах з світлочутливою КМОП-матрицею у пропонованій ППСВК при автоматичному аналізі інтенсивностей спектрального розподілу для визначення хімічного складу металовмісних речовин схематично представлено на рис. 4.15.

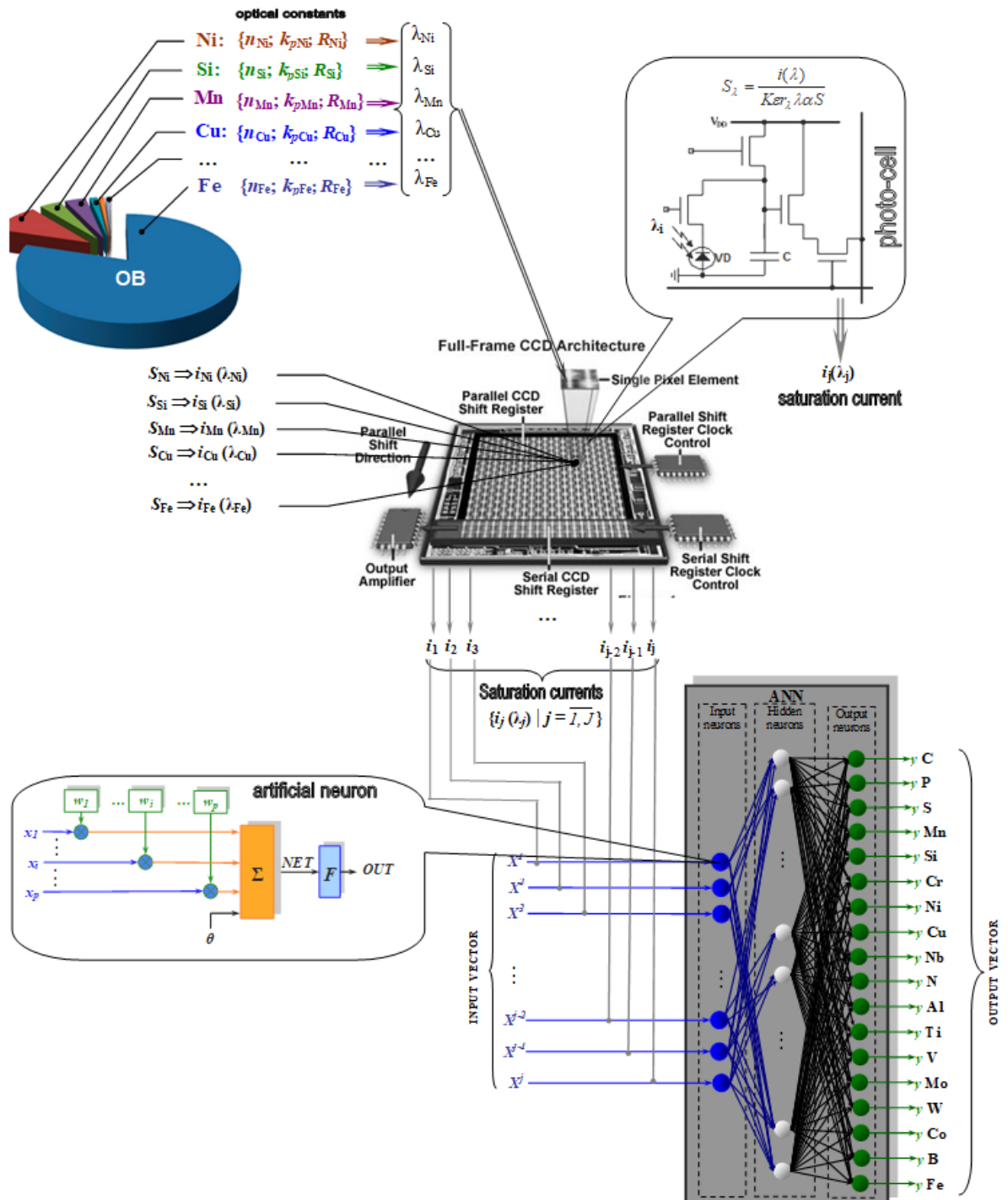


Рис. 4.16. Схематичне представлення функціональної взаємодії пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів у металовмісних матеріалах з КМОП-матрицею пропонованої ППСВК

Перший так званий “вхідний” шар пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів у металовмісних матеріалах утворюється вхідними нейронами і призначений для приймання вхідної інформації, а саме, інтенсивностей спектрального розподілу з КМОП-матриці у вигляді вхідного вектору $X = \{x_s \mid s = \overline{1; S}\}$, де $S=c \times r$, де c – кількість стовпчиків матриці, r – кількість рядків матриці (рис. 4.16). Наприклад, при застосуванні КМОП-матриці OV16880 або OV20880 виробництва OmniVision (США) S становить 307500 пікселів.

На вхід пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів у металовмісних матеріалах подаються попередньо нормалізовані значення інтенсивностей спектрального розподілу, кількість елементів якої становить 256, тому розмірність вхідного вектору становить 256 компонент.

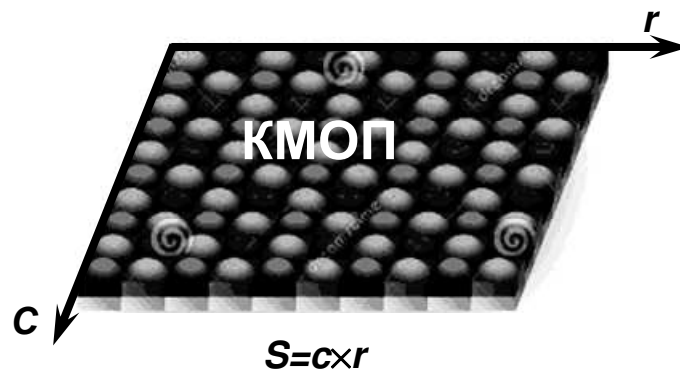


Рис. 4.17. Схематичне зображення КМОП-матриці

Розмірність вхідного вектору X при цьому обумовлюється роздільною здатністю матриці.

На виході пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів у металовмісних матеріалах формується вихідний вектор Y значень наявності хімічних елементів у складі аналізованого металовмісного матеріалу. Рішення про наявність хімічного елементу у складі матеріалу ОВ приймається інтерпретатором відповіді мережі „переможець отримує все”, в якому кількість вихідних сигналів відповідає кількості аналізованих хімічних елементів, що можуть міститися у металовмісних матеріалах ОВ.

Відповідно структура вихідного вектору може бути представлена виразом (4.9):

$$Y = \{y_m \mid m = \overline{1; M}\}, \quad (4.9)$$

де Y – вектор вихідних сигналів пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів у металовмісних матеріалах;

y_m – вихідний сигнал пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів у металовмісних матеріалах, що відповідає наявності m -го хімічного елементу у металовмісному матеріалі ОВ;

M – кількість хімічних елементів, що розпізнаються.

Розмірність вихідного шару пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів у металовмісних матеріалах становить 62 нейрони, відповідно до переліку хімічних елементів, що можуть міститися в металовмісних речовинах.

Розмірність прихованого шару визначалась емпірично в два етапи та варіювалась під час експериментальних досліджень пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів у металовмісних матеріалах. Зокрема на першому етапі синтезу пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів у металовмісних матеріалах кількість нейронів прихованого шару була прийнята рівною кількості нейронів на вході. На другому етапі, при навчанні пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів у металовмісних матеріалах кількість нейронів прихованого шару коригувалась відповідно до успішності її навчання. При цьому граничні значення кількості нейронів прихованого шару розраховувались за відомими евристичними формулами (4.4) та (4.5).

4.6.2. Формування навчальної множини для навчання штучної нейронної мережі автоматичного розпізнавання хімічних елементів

Для навчання пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів у металовмісних матеріалах створена навчальна БД, фрагмент якої наведено в табл. Г.1 (Додаток Г). Приведені в табл. Г.1 (Додаток Г) приклади навчальної множини являють собою нормалізовані та представлені у вигляді

цифрового коду значення напруг фоточутливих елементів КМОП-матриці в залежності від інтенсивності спектрального розподілу відповідних хімічних елементів, що можуть міститися у металовмісних матеріалах. Наприклад, на рис. 4.18 – рис. 4.20 приведено інтенсивність спектрального розподілу алюмінію, графік інтенсивностей спектрального розподілу алюмінію, а також нормалізовані та представлені у вигляді цифрового коду значення напруг фоточутливих елементів КМОП-матриці в залежності від інтенсивності спектрального розподілу алюмінію



Рис. 4.18. Інтенсивність спектрального розподілу алюмінію

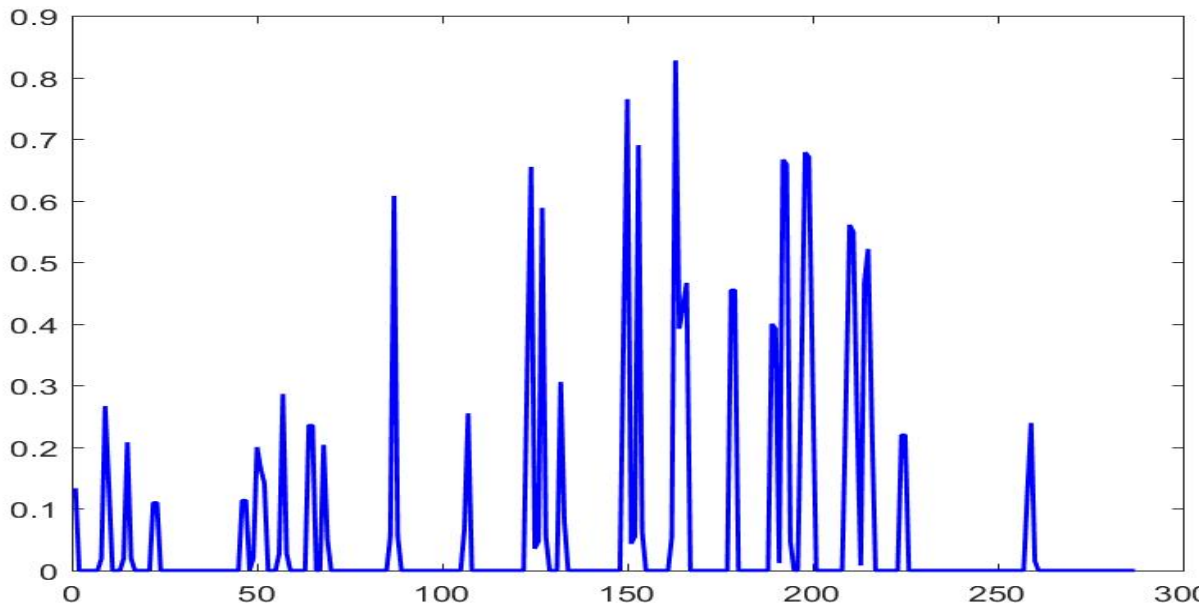


Рис. 4.19. Графік інтенсивностей спектрального розподілу алюмінію

0,133333333	0	0	0	0	0	0	0,019607843	0,266666667				
0,137254902	0	0	0	0,019607843	0,207843137	0,019607843	0	0				
0	0	0	0,109803922	0,109803922	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0,11372549	0,11372549	0	0,019607843	0,2					
0,164705882	0,141176471	0	0	0	0,02745098	0,28627451						
0,02745098	0	0	0	0	0	0,235294118	0,235294118	0	0			
0,203921569	0,050980392	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0,054901961	0,607843137				
0,054901961	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0,066666667	0,254901961	0	0	0		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0,341176471	0,654901961	0,035294118	0,047058824	0,588235294	0,054901961	0						
0	0	0,305882353	0,078431373	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,4	0,764705882			
0,043137255	0,054901961	0,690196078	0,062745098	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0,054901961	0,82745098	0,392156863	0,42745098	0,466666667	0					
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,454901961		
0,454901961	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4	
0,392156863	0,011764706	0,666666667	0,658823529	0,047058824	0	0						
0,329411765	0,678431373	0,670588235	0,317647059	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0,270588235	0,560784314	0,549019608	0,254901961						
0,007843137	0,466666667	0,521568627	0,243137255	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0,219607843	0,219607843	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,125490196	0,239215686	0,015686275	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 4.20. Нормалізовані та представлені у вигляді цифрового коду значення напруг фоточутливих елементів КМОП-матриці в залежності від інтенсивності спектрального розподілу алюмінію

Навчання пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів у металовмісних матеріалах необхідно проводити за методом „навчання з вчителем” [27, 28] (див. п. 4.6.2).

4.6.3 Практична реалізація та навчання штучної нейронної мережі автоматичного розпізнавання хімічних елементів

Практична реалізація пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів здійснена в програмному середовищі нейроімітатора Neural Analyzer аналітичного пакету Deductor Professional (Lite-версії) [25]. На входи пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів подається вхідний вектор X зміст компонент якого представлено в табл. Г.1 (див. додаток Г). На виході пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів формується вихідний вектор Y з відповідною кількістю компонент, зміст яких описано виразом (4.10) та представлено в табл. Г.1 (див. додаток Г).

4.6.4. Оптимізація структури штучної нейронної мережі автоматичного розпізнавання хімічних елементів

З метою структурного коригування моделі пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів проведено низку експериментальних досліджень із зміною розмірності прихованого шару в діапазоні $L = [15; 280]$, що обчислений за формулою (4.7) (табл. Г.1 (див. додаток Г)).

Графіки зміни величини середньо квадратичної помилки при навчанні пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів в залежності від розмірності прихованого шару для кожного варіанту розміру прихованого шару представлені на рис. 4.21.

На підставі приведенного на рис. 4.21, можна вказати, що найменша величина помилки у ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів з розмірністю прихованого шару 275 нейронів. Дане твердження є підставою для вибору ШНМ-2 з параметрами: вхідних нейронів 256, прихованих нейронів 275, вихідних нейронів 62.

Таблиця 4.18.

Параметри досліджуваних моделей пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів та час їх навчання

№ моделі ШНМ	Параметри досліджуваної моделі ШНМ	Тривалість навчання		Розмір навчальної множини	Параметри ЕОМ на якій поводилось експериментальне дослідження ШНМ
		Кількість ітерацій	Час навчання		
ШНМ-1	вхідних нейронів 256; вихідних нейронів 62; прихованих шарів 1; нейронів прихованого шару 256	4751	1 год	150 прикладів	Intel® Pentium ® CPU B970@ 2.3 GHz 2.3 GHz/ DDRII 4Gb
ШНМ-2	вхідних нейронів 256; вихідних нейронів 62; прихованих шарів 1; нейронів прихованого шару 270	9502	1,5 год		
ШНМ-3	вхідних нейронів 256; вихідних нейронів 275; прихованих шарів 1; нейронів прихованого шару 62	14253	2 год		
ШНМ-4	вхідних нейронів 256; вихідних нейронів 62; прихованих шарів 1; нейронів прихованого шару 280	19004	20 хв.		
ШНМ-5	вхідних нейронів 256; вихідних нейронів 62; прихованих шарів 1; нейронів прихованого шару 250	861	45 хв.		
ШНМ-6	вхідних нейронів 40; вихідних нейронів 2; прихованих шарів 1; нейронів прихованого шару 150	7861	30 хв.		
Діапазон зміни величини прихованого шару		від 15 до 280 нейронів			

Середня квадратична похибка, %

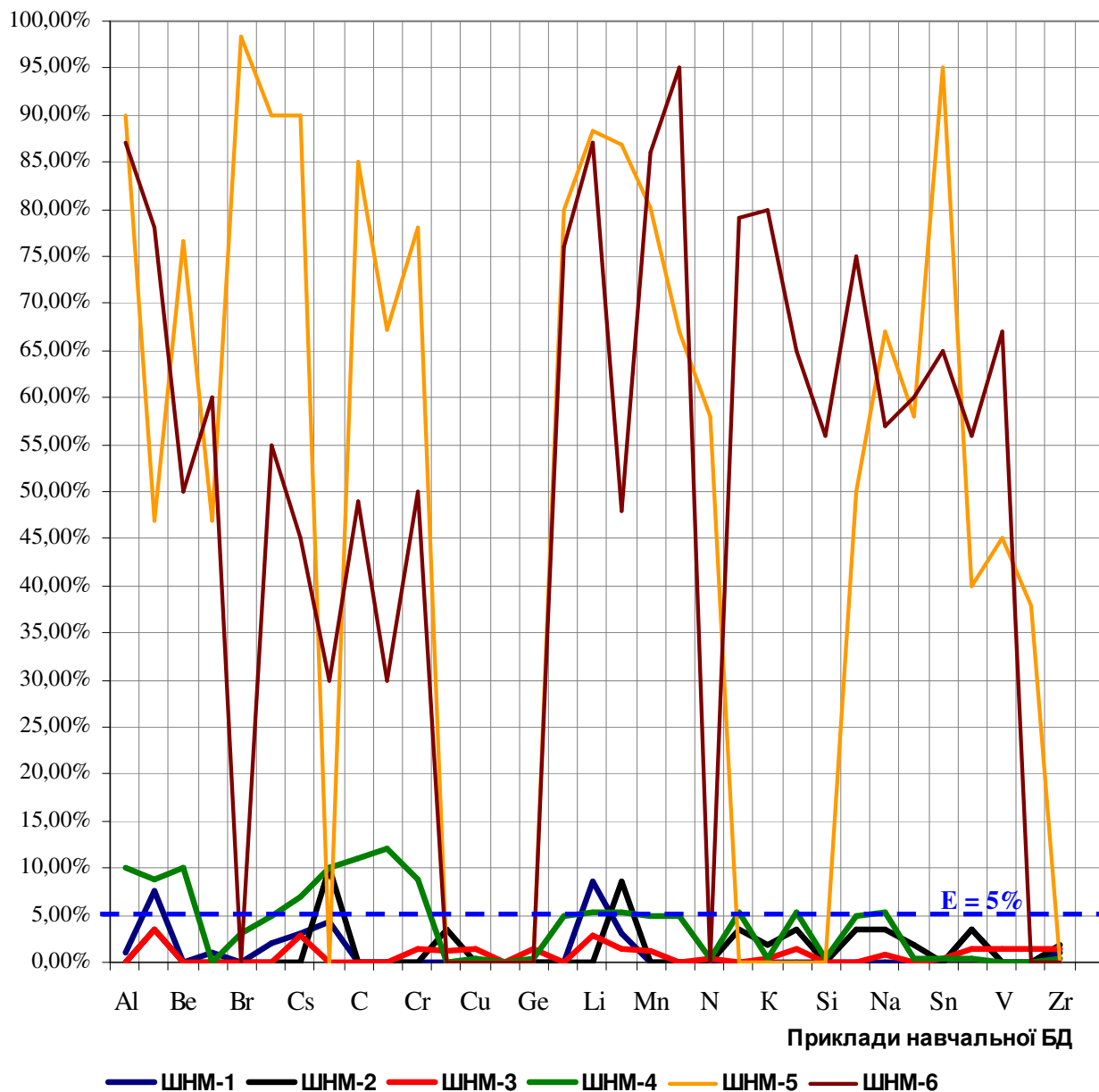


Рис. 4.21. Графіки зміни величини середньої квадратичної похибки в залежності від розмірності прихованого шару пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів

Висновки до розділу 4

1. Розроблено метод визначення систематичних та випадкових складових похибок вимірювання на основі ШНМ, що дає можливість зосередити зусилля користувачів на виборі вірного методу їх обробки, нормування, та компенсації відповідно до вимог, що регламентуються нормативними документами.

2. Розроблено модель ШНМ автоматичного розпізнавання систематичних та випадкових складових похибок вимірювання кутів, що використовується на етапі аналізу та обробки вимірювальної інформації та виконує експрес-аналіз складових похибок вимірювання за принципом декомпозиції.

3. Розроблено метод визначення складу металовмісних матеріалів ОВ на основі ШНМ, що реалізує розширені функціональні можливості пропонованої ППСВК.

4. Розроблено модель ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних речовин у металовмісних матеріалах, що використовується для експрес-аналізу інтенсивностей спектрального розподілу хімічних речовин при визначення їх вмісту у складі металовмісних матеріалів.

5. Проведено оптимізацію структур пропонованих ШНМ з метою забезпечення їх швидкодії та мінімізації похибки роботи, величина якої не перевищує 5%.

Література до розділу 4

1. Капля Е. В., Кузнецов В. С., Шевчук В. П. Моделирование процессов управления в интеллектуальных измерительных системах: Монография. – М.: Физматлит, 2009. – 512 с.

2. Иващенко Е. М. Результаты исследования погрешности гониометрической системы / Е. А. Барина, Е. М. Иващенко, П. А. Павлов // Известия СПбГЭТУ “ЛЭТИ”. – 2010. – №5. – С. 98-103.

3. Шевчук В. П., Капля В. И., Желтоногов А. П., Лясин Д. Н. Метрология интеллектуальных измерительных систем: Монография. – ВолгГТУ, Волгоград, 2005. – 210 с.

4. ДСТУ 8.009:2008 Державна система забезпечення єдності вимірювань. Нормовані метрологічні характеристики засобів вимірювань. Київ, 2008. – 20 с.
5. ДСТУ-Н РМГ 63:2013 Державна система забезпечення вимірювань. Забезпечення ефективності вимірювань при управлінні технологічними процесами. Київ, 2013. – 18 с.
6. Ian Farrance, Robert Frenkel Uncertainty of Measurement: A Review of the Rules for Calculating Uncertainty Components through Functional Relationships // *Clin Biochem Rev.* – 2012. – № 33(2). – P. 49–75.
7. Christopher L. Bennett, Crispin Odom, Matan Ben-Asher “Knee Angle Estimation based on IMU data and Artificial Neural Networks”, *IEEE Xplore is transitioning to HTTPS, Biomedical Engineering Conference (SBEC) 2013*, 3-5 May. (DOI: 10.1109/SBEC.2013.64) [Electronic resource]. – Access: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6525701/>
8. Nikhil A Shrirao, Narendra P Reddy, Durga R Kosuri1 “Neural network committees for finger joint angle estimation from surface EMG signals”, *Biomed Eng Online.*, Vol 8: 2, 2009. Published online 2009 Jan 20. (DOI: 10.1186/1475-925X-8-2) [Electronic resource]. – Access: www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2661079/
9. Alberto Del Angel, Mevludin Glavic, Louis Wehenkel “Using Artificial Neural Networks to Estimate Rotor Angles and Speeds from Phasor Measurements”, [Electronic resource]. – Access: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.151.7413&rep=rep1&type=pdf>
10. Junhua Zhang, Hongjian Li, Liang Lv, Yufeng Zhang “Computer-Aided Cobb Measurement Based on Automatic Detection of Vertebral Slopes Using Deep Neural Network”, *International Journal of Biomedical Imaging*, Volume 2017 (2017), (Article ID 9083916), [Electronic resource]. – Access: www.hindawi.com/journals/ijbi/2017/9083916/
11. A. Di Noia, O. P. Hasekamp, G. van Harten, J. H. H. Rietjens, J. M. Smit, F. Snik, J. S. Henzing, J. de Boer, C. U. Keller, H. Volten “Use of neural networks in ground-based aerosol retrievals from multi-angle spectropolarimetric observations”, *Atmospheric Measurement Techniques*, pp. 281–299, 2015, Vol. 8. (DOI:10.5194/amt-8-281-2015)

[Electronic resource]. – Access: www.atmos-meas-tech.net/8/281/2015/amt-8-281-2015.pdf

12. İlhan OTAĞ, Serkan AKKOYUN, Yaşar TAŞTEMUR, Mehmet ÇİMEN “Boehler’s Angle Estimations in Calcaneus Bone by Using Artificial Neural Networks”, *Cumhuriyet University Faculty of Science, Science Journal (CSJ)*, 2015, Vol. 36, No: 5.

[Electronic resource]. – Access: <http://dergipark.gov.tr/download/article-file/48914>

13. N. Manivannan, M. A. A. Neil, "Automatic angle measurement of a 2D object using optical correlator-neural networks hybrid system", *Proc. SPIE 8055, Optical Pattern Recognition XXII*, 80550C (26 April 2011); (DOI: 10.1117/12.883653).

[Electronic resource]. – Access: <https://doi.org/10.1117/12.883653>

14. Yang Li, Pan Fu, Zhong Li, Xiaohui Li, Zhibin Lin “Biaxial Angle Sensor Calibration Method Based on Artificial Neural Network”, *Chemical Engineering Transactions*, pp 361-366, 2015, Vol. 46. (DOI: 10.3303/CET1546061). [Electronic resource]. – Access: pdfs.semanticscholar.org/e9fa/3d64168e871ee978d5e711bd9e0115792529.pdf

15. Касьяник В. В. Применение нейросетевого подхода для оценки погрешности одометров мобильного робота / В. В. Касьяник, А. П. Дунец, И. П. Дунец, В. Н. Шуть. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://robotics.bstu.by/mwiki/images/8/8d/Neuroinformatika_2012.pdf

16. Хиноева О. Б. Разработка и применение нейросетевых алгоритмов учета погрешностей эталонных средств при калибровке угломерных геодезических приборов: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 25.00.32 “Геодезия” / Ольга Борисовна Хиноева. – Москва, 2007. – 24 с.

17. Скворцов М. Г., Зрюмов Е. А., Пронин С. П. Нейросетевой измерительный преобразователь // Известия ВолгГТУ. – 2011. – №5. – Том 6. – С. 88 – 90

18. Зрюмов П. А. Исследование погрешности оптического метода контроля частоты вибрации объекта, основанного на применении генетического алгоритма // Ползуновский альманах. – 2009. – №2. – С. 123 – 125

19. L.T. Herbert, Z.N.L. Hansen Restructuring of workflows to minimise errors via stochastic model checking: An automated evolutionary approach // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2016, January. – Volume 145. – P. 351–365

20. Вайсензее К., Польте Г. А., Линс Г. Автоматизированное определение

погрешности геометрических измерений // Известие ВУЗов. Приборостроение. – 2011. – №12 (54). – С. 47 – 49

21. Irina Cherepanska, Elena Bezvesilna, Artem Sazonov, Sergey Nechai, Tatiana Khylichenko The procedure for determining the number of measurements in the normalization of random error of an information-measuring system with elements of artificial intelligence // Eastern-European journal of enterprise technologies. 2017. № 5/9 (89). P. 58 – 67

22. Патент на корисну модель 124155 (Україна), МПК: G 01 B 21/22 (2006.01). Спосіб вимірювання кутів / І. Ю. Черепанська, О. М. Безвесільна, А. Ю. Сазонов. – Реєстрац. номер заявки u 2017 09792. Заявл. 09.10.2017; Надр. 26.03.2018, Бюл. №6.

23. Патент на корисну модель 127373 (Україна), МПК: G 01 B 21/22 (2006.01). Інтелектуальна система вимірювання кутів / І. Ю. Черепанська, О. М. Безвесільна, А. Ю. Сазонов. – Реєстрац. номер заявки u 2018 02424. Заявл. 12.03.2018; Надр. 25.07.2018, Бюл. №14.

24. Irina Cherepanska, Elena Bezvesilna, and Artem Sazonov Artificial Neural Network as a Basic Element of the Automated Goniometric System / Recent Advances in Systems, Control and Information Technology. 2016. p 43 -52.

25. Аналитический пакет Deductor Professional: [руководство пользователя]. – BaseGroupLabs, 2002. – 184 с.

26. Анил К. Джейн. Введение в искусственные нейронные сети: [пер. с англ.] / Анил К. Джейн. – Мичиганский государственный университет, США, 1996. – 144 с.

27. Вороновский Г. К. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Г. К. Вороновский, К. В. Махотило, С. Н. Петрашев, С. А. Сергеев. – Х.: Основа, 1997. – 112 с.

28. Дьяконов В. П. Matlab 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2 + Simulink 5/6. Инструменты искусственного интеллекта и биоинформатики / В. П. Дьяконов, В. В. Круглов. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2006. – 456 с.

29. Заенцев И. В. Нейронные сети: основные модели / И. В. Заенцев. – Воронеж: „Воронеж”, 1999. – 76 с.

30. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: теория и практика [пер. с англ.] / Ф.Уоссермен. – М.: Мир, 1992. – 183 с.
31. Черепанська І. Ю. Автоматизація процесу керування вибором пристроїв орієнтування при проектуванні гнучких інтегрованих систем: дис. канд. техн. наук: 05.13.07 “Автоматизація процесів керування” / Ірина Юріївна Черепанська. – Київ., 2008. – 380 с.
32. Черепанська І. Ю. Кирилович В. А., Безвесільна О. М., Сазонов А. Ю. Теорія і принципи побудови автоматизованої системи для лінійних і кутових переміщень об'єктів виробництва з використанням математичного апарату кватерніонів і елементів штучного інтелекту [Монографія].– Житомир: ЖДТУ, 2016. – 326 с.
33. Черепанська І. Ю. Штучні нейронні мережі для вирішення задач технологічної підготовки гнучкого виробництва: монографія. Монографія / І. Ю. Черепанська, О. М. Безвесільна, А. Ю. Сазонов. – Київ: ДП “НВЦ “Пріорітети”, 2018. – 192 с.
34. Rojas R. Neural Networks. A Systematic Introduction. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996. – 502 p.
35. Методы нейроинформатики: сб. науч. труд. Красноярского государственного технического университета. – Красноярск.: КГТУ, 1998. – 205 с.
36. Irina Cherepanska The procedure for determining the number of measurements in the normalization of random error of an information-measuring system with elements of artificial intelligence / Irina Cherepanska, Elena Bezvesilna, Artem Sazonov, Sergey Nechai, Tatiana Khylichenko // Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2017. – № 5/9 (89). – P. 58 – 67.
37. Багатогранні призми. Каталог виробника [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://instrumentalist.ru/Prizmy-PM.htm>
38. Призми правильні багатогранні ППМ ГОСТ 2875-88 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://kalibr.info/Ins-Prizmy-mnogogrannye-PPM-GOST-2875-88.html>
39. Призми неправильні багатогранні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://energo-avtomatika.ru/produktsiya/etalonnyie_si/prizmyi_ppm/

40. Безвесільна О. М. Автоматизований прецизійний пристрій для вимірювання кутів: Монографія. – Житомир: ЖДТУ, 2010. – 258 с.
41. Lightweight spectro goniometer. University of Southampton [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.southampton.ac.uk/geography/research/projects/lightweight_spectro_goniometer.page
42. Martínez-Antón J. C. Automatic three-dimensional spectrogoniometer for determination of optical properties and surface parameters / Martínez-Antón J. C., Bernabeu E. – Applied Optics. – Vol. 33, Issue 25, 1994. – P. 6059 – 6061.
43. Capitelli F. Determination of heavy metals in soils by Laser Induced Breakdown Spectroscopy / F. Capitelli, M. R Provenzano, F. Colao, N.Senesi. – Geoderma. – Vol. 106, Issues 1–2, 2002, P. 45 – 62.
44. Determination of a brass alloy concentration composition using calibration-free laser-induced breakdown spectroscopy / M. Achouri, T. Baba-Hamed, S. A. Beldjilali, A. Belasri // Plasma Physics Reports. – September 2015, Volume 41, Issue 9, pp 758–768.
45. Diwakar P. New Approach for Near-Real-Time Measurement of Elemental Composition of Aerosol Using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy / Prasoon Diwakar, Pramod Kulkarni, and M. Eileen Birch // Aerosol Sci Technol, Vol. 46 (3), 2012. – P. 316-332.
46. Оптико-эмиссионный спектрометр ARL 4460, [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://thermotechno.ru/catalog/143/396/>
47. Разработка и производство современных атомных оптико-эмиссионных спектрометров. Атомные оптико-эмиссионные спектрометры: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.iskroline.ru/spectrometers/
48. Спектрофотометр ULAB 102 (325-1000 нм, программируемый) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://prom.ua/p99301350-spektrofotometr-ulab-102.html>

РОЗДІЛ 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ПРЕЦИЗІЙНОЇ ПРИЛАДОВОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ. ЗГЛАДЖУВАННЯ ТА ФІЛЬТРАЦІЯ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПОЯВУ ТА ВЕЛИЧИНУ ВИПАДКОВОЇ ПОХИБКИ

5.1. Методика експериментального дослідження похибок функціонування штучних нейронних мереж

Експериментальні дослідження похибок функціонування пропонованих ШНМ передбачає проведення їх за певною послідовністю – методикою. Методика, що дає можливість за мінімальну кількість „прогонів” моделей ШНМ і при мінімальних затратах ресурсів отримати статистично значимі висновки або знайти оптимальні рішення щодо функціонування системи відома, та наведена в літературі [1, 2, 3].

Так методика експериментального дослідження похибок функціонування пропонованих моделей ШНМ передбачає виконання трьох етапів.

I етап – формування вектора множини вхідних даних. Вхідний вектор пропонованих ШНМ формується як вектор множини вхідних даних, що попередньо заносяться і зберігаються як тестова множина у БД для тестування пропонованих ШНМ.

Так БД тестових прикладів для тестування пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання, сформована на підставі лабораторних вимірювань кутів різних багатограних призм [4, с. 76-86, 113-114, 158-161] та моделюванням на ПК. Фрагмент БД тестових прикладів для тестування пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання приведено в табл. 5.1.

БД тестових прикладів для тестування пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів як складових металовмісних матеріалів сформована на підставі результатів натурних вимірювань спектрального розподілу. Фрагмент БД тестових прикладів для тестування пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів приведено в табл. 5.2.

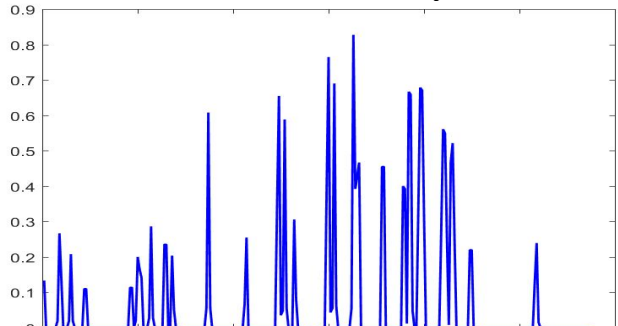
Таблиця 5.1.

Фрагмент БД тестових прикладів для тестування запропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання

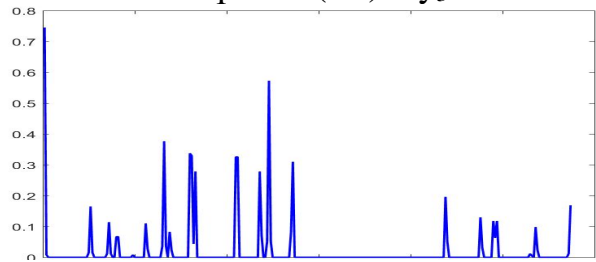
Кодове позначення прикладу у БД	Векторний алфавіт вхідного вектору $X = \{x_k \mid k = \overline{1; 40}\}$ виміряних значень кута, φ_k , сек.																			
	від x_1 до x_{20}																			
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}	x_{20}
ППБ-24 / 61	59,66	59,75	59,84	59,74	59,84	59,67	59,73	59,61	59,86	59,81	59,28	59,08	59,11	59,16	59,18	59,11	59,37	59,33	59,37	59,37
ППБ-24 / 62	60,0003	60,0006	60,0009	60,0012	60,0015	60,0018	60,0021	60,0024	60,0027	60,003	60,0033	60,0036	60,0039	60,0042	60,0045	60,0048	60,0051	60,0054	60,0057	60,006
ППБ-6 / 63	4,99	5	4,99	5,02	5	5	5,01	5,02	5,02	4,99	5	4,99	5	5,02	5,01	4,99	4,99	5	5,01	5,01
ППБ-6 / 64	5,0003	5,0006	5,0009	5,0012	5,0015	5,0018	5,0021	5,0024	5,0027	5,003	5,0033	5,0036	5,0039	5,0042	5,0045	5,0048	5,0051	5,0054	5,0057	5,006
ППБ-18 / 65	9,98	10	10	9,99	10	10	9,99	9,99	10	9,99	10	10,01	9,99	9,99	9,99	10	10	9,97	10,01	10,01
ППБ-18 / 66	10,02	10	9,97	9,99	10	10	10	10	9,98	10,01	9,98	10,02	10	10	10	9,99	9,99	9,99	10	9,99
ППБ-12 / 67	60,0103	60,0106	60,0109	60,0112	60,0115	60,0118	60,0121	60,0124	60,0127	60,013	60,0133	60,0136	60,0139	60,0142	60,0145	60,0148	60,0151	60,0154	60,0157	60,016
ППБ-12 / 68	60,0403	60,0406	60,0409	60,0412	60,0415	60,0418	60,0421	60,0424	60,0427	60,043	60,0433	60,0436	60,0439	60,0442	60,0445	60,0448	60,0451	60,0454	60,0457	60,046
ППБ-8 / 69	15,13	15,28	15,18	15,13	14,77	14,86	15,89	15,76	14,76	15,3	14,18	14,73	15,19	15,11	15,12	14,61	14,89	14,34	14,96	15,55
ППБ-8 / 70	15,04	13,71	14,71	15,34	15,63	15,81	14,74	14,77	15,29	14,97	15,46	14,43	14,24	15,13	15,28	14,92	16,41	15,81	14,47	16,17
від x_{21} до x_{40}																				
x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}	x_{26}	x_{27}	x_{28}	x_{29}	x_{30}	x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{34}	x_{35}	x_{36}	x_{37}	x_{38}	x_{39}	x_{40}	
ППБ-24/ 61	59,42	59,43	59,36	59,35	59,34	59,27	59,36	59,05	59,18	59,18	59,43	59,23	59,28	59,36	59,32	59,18	59,35	59,03	58,91	59,12
ППБ-24/ 62	60,0063	60,0066	60,0069	60,0072	60,0075	60,0078	60,0081	60,0084	60,0087	60,009	60,0093	60,0096	60,0099	60,0102	60,0105	60,0108	60,0111	60,0114	60,0117	60,012
ППБ-8/ 63	14,73	14,41	15,61	15,15	15,02	14,98	14,86	14,82	15	14,42	13,41	16,17	14,06	15,37	15,4	16,24	14,45	14,87	14,58	15
ППБ-8/ 64	15,75	15,43	14,49	15,03	15,31	15,87	15,29	15,09	15,48	15,01	15,87	14,26	14,31	14,75	14,89	15,09	15,4	14,54	13,92	15
ППБ-6/ 65	5,02	5,01	4,98	5	5	5,02	5	4,99	5,01	5,01	5,01	5	4,99	4,98	5	5	5,02	5,01	4,99	5,01
ППБ-6/ 66	5,0063	5,0066	5,0069	5,0072	5,0075	5,0078	5,0081	5,0084	5,0087	5,009	5,0093	5,0096	5,0099	5,0102	5,0105	5,0108	5,0111	5,0114	5,0117	5,012
ППБ-18/ 67	9,99	10,01	9,99	10,01	10	10	10,01	10	10,03	10	10	9,99	9,98	9,99	9,99	10	10	9,97	10	9,98
ППБ-18/ 68	10,01	9,99	9,99	9,99	10	9,99	9,99	9,99	10	10	10	9,98	10	10,01	10,02	9,99	9,99	10	9,99	9,99
ППБ-12/ 69	60,0163	60,0166	60,0169	60,0172	60,0175	60,0178	60,0181	60,0184	60,0187	60,019	60,0193	60,0196	60,0199	60,0202	60,0205	60,0208	60,0211	60,0214	60,0217	60,022
ППБ-12/ 70	60,0463	60,0466	60,0469	60,0472	60,0475	60,0478	60,0481	60,0484	60,0487	60,049	60,0493	60,0496	60,0499	60,0502	60,0505	60,0508	60,0511	60,0514	60,0517	60,052

Таблиця 5.2.

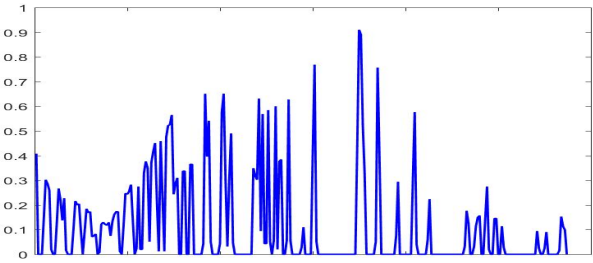
Фрагмент БД тестових прикладів для тестування пропонуваної ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів

Назва хімічного елементу / Компонента вихідного вектору Y / Графік інтенсивностей спектрального розподілу	Нормалізовані значення інтенсивностей спектрального розподілу / Вхідний вектор навчальної множини									
Алюміній (Al) – y_1 	0,13333333	0	0	0	0	0	0,019607843	0,266666667	0,137254902	
	0	0	0	0,019607843	0,207843137	0,019607843	0	0	0	0
	0	0,109803922	0,109803922	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0,11372549	0,11372549	0	0,019607843	0,2	0,164705882	0,141176471		
	0	0	0	0,02745098	0,28627451	0,02745098	0	0	0	0
	0	0,235294118	0,235294118	0	0	0,203921569	0,050980392	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0,054901961	0,607843137	0,054901961	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0,066666667	
	0,254901961	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0,341176471	0,654901961	0,035294118	0,047058824			
	0,588235294	0,054901961	0	0	0	0,305882353	0,078431373	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,4	0,764705882	0,043137255	0,054901961	0,690196078	0,062745098	0	0		
	0	0	0	0	0,054901961	0,82745098	0,392156863	0,42745098		
	0,466666667	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,454901961	0,454901961	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,4	0,392156863	0,011764706	0,666666667	0,658823529	0,047058824	0	0		
	0,329411765	0,678431373	0,670588235	0,317647059	0	0	0	0	0	
	0	0	0,270588235	0,560784314	0,549019608	0,254901961	0,007843137			
	0,466666667	0,521568627	0,243137255	0	0	0	0	0	0	0
	0,219607843	0,219607843	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0,125490196		
	0,239215686	0,015686275	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0					

Продовження табл. 5.2

Берилій (Be) – y_3													
	0,745098039	0,007843137	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,015686275	0,164705882	0,015686275	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,011764706	0,11372549	0,011764706	0	0	0,066666667	0,066666667	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0,007843137	0	0	0	0	0	0	0
	0	0,109803922	0,02745098	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,035294118	0,376470588	0,035294118	0	0,082352941	0,023529412	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0,337254902	0,329411765	0,043137255	0	0	0	0	0
	0,278431373	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0,325490196	0	0	0	0
	0,325490196	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,278431373	0,070588235	0	0	0,050980392	0,57254902	0,050980392	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0,082352941	0,309803922	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0,196078431	0,050980392	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,129411765	0,031372549	0	0	0	0	0	0,117647059	0,062745098	0	0	0	0
	0,117647059	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0,011764706	0,003921569	0	0,098039216	0	0	0	0
	0,023529412	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0,011764706	0,168627451	0	0	0	0	0	0

Закінчення табл. 4.2

Цезій (Cs) – y_7											
		0,407843137	0	0	0	0,145098039	0,301960784	0,28627451	0,258823529		
		0,019607843	0	0	0	0,125490196	0,266666667	0,219607843	0,137254902		
		0,22745098	0,015686275	0	0	0	0,101960784	0,215686275	0,2		
		0,203921569	0,094117647	0	0,090196078	0,184313725	0,168627451	0,17254902			
		0,070588235	0,074509804	0,082352941	0	0,007843137	0,121568627	0,129411765			
		0,121568627	0,117647059	0,129411765	0,074509804	0,133333333	0,160784314				
		0,17254902	0,17254902	0,011764706	0	0,11372549	0,247058824	0,243137255			
		0,254901961	0,282352941	0,137254902	0	0,023529412	0,274509804	0,019607843			
		0,019607843	0,329411765	0,376470588	0,349019608	0,050980392	0,37254902				
		0,415686275	0,450980392	0,211764706	0,011764706	0,458823529	0,231372549				
		0,011764706	0,474509804	0,521568627	0,525490196	0,564705882	0,243137255				
		0,28627451	0,309803922	0	0	0,337254902	0,337254902	0	0		
		0,364705882	0,364705882	0	0	0	0,043137255	0,650980392			
		0,396078431	0,541176471	0,050980392	0	0	0	0,043137255			
		0,576470588	0,650980392	0,298039216	0,031372549	0,305882353	0,490196078				
		0,047058824	0	0	0	0	0	0	0		
		0,349019608	0,317647059	0,301960784	0,631372549	0,094117647	0,568627451				
		0,043137255	0,043137255	0,584313725	0,050980392	0	0,054901961	0,6			
		0,019607843	0,376470588	0,384313725	0	0	0,054901961	0,62745098			
		0,054901961	0	0	0	0	0,02745098	0,109803922	0	0	
		0	0	0,4	0,768627451	0,050980392	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0,435294118	0,909803922	0,890196078	0,525490196	0,325490196	0		
		0	0	0	0	0,050980392	0,756862745	0,396078431	0	0	0
		0	0	0	0	0	0,074509804	0,294117647	0	0	0
		0	0	0	0,301960784	0,576470588	0,039215686	0	0	0	0
		0	0,058823529	0,223529412	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0	0,031372549	
		0,176470588	0,125490196	0	0	0,031372549	0,11372549	0,149019608			
		0,156862745	0	0	0,141176471	0,274509804	0,019607843	0	0		
		0,145098039	0,145098039	0	0	0,11372549	0,02745098	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0,094117647	0,023529412	0	0	0,023529412	0,090196078	0	0	0
		0	0	0	0	0,015686275	0,152941176	0,11372549	0,098039216	0	

II етап – встановлення параметрів даних. На входи пропонується ШНМ подається набір вхідних даних, представлених у числовому форматі. Діапазон зміни даних від 0 до 1. Причому наявність певної ознаки відповідає 1, а відсутність – 0 на входах пропонується ШНМ. Відповідно максимальне значення входу дорівнює 1, а мінімальне – 0 [1, 2, 3].

III етап – підключення БД тестових прикладів для тестування пропонується ШНМ до нейроімітатора. Розрахунок виходів та величини похибок. Побудова графіків відхилення бажаних значень виходів від фактичних для кожної з пропонується моделей ШНМ для ілюстрації зміни величини похибки при функціонуванні пропонується ШНМ. Інтерпретація отриманих результатів.

5.2. Експериментальне дослідження похибок функціонування штучної нейронної мережі автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання за принципом їх декомпозиції

Результати експериментального дослідження похибок функціонування пропонується ШНМ автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання представлено у вигляді графіку зміни середньої квадратичної похибки (рис. 5.1).

Отримані результати можуть бути інтерпретовані наступним чином.

Для розпізнавання складових похибок вимірювання побудовано ШНМ автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання з параметрами: кількість нейронів вхідного шару 40, прихованого шару – 40, вихідного шару – 2. При тестуванні ШНМ автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання величина похибки її виходів не перевищує 5%, що вказує на відмінний результат роботи.

Швидкодія роботи пропонується ШНМ автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання для тестових прикладів, в тому числі при вимірюванні кутів 24-гранної призми, становить 2 с., що відповідає режиму реального часу.

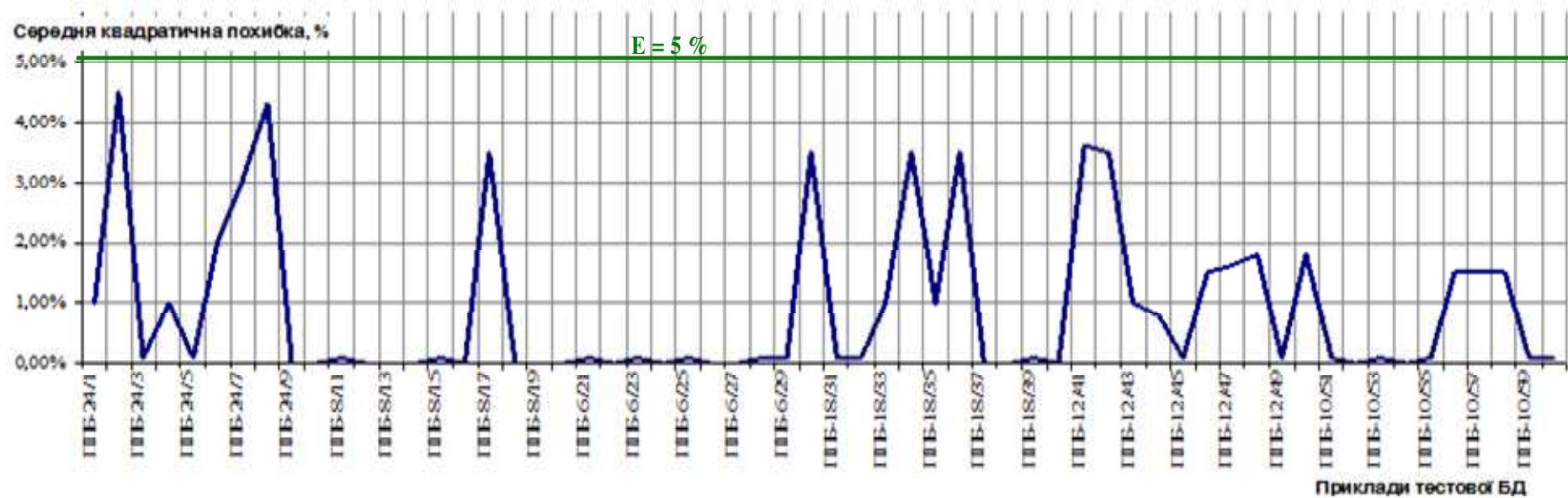


Рис. 5.1. Графік зміни середньої квадратичної похибки виходів пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання за результатами експериментального дослідження її функціонування

При цьому, необхідно взяти до уваги, що час обробки інформації пропонованою ШНМ автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання залежить як від технічних характеристик власне ШНМ (від тактової частоти процесора ПК, на якому встановлено нейроімітатор, розрядності, кількості нейронів прихованого шару ШНМ тощо), так і від розмірності вимірювальної інформації. Зокрема, експериментальні дослідження пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання проводились на ПК з наступними параметрами: процесор – Intel (R) Core (TM) i3-7020U CPU 2,3GHz, ОЗУ 4,00 Гб; тип операційної системи – 64-розрядна операційна система, процесор ×64.

Таким чином, результати проведеного комп'ютерного моделювання роботи розробленої ШНМ автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання вказують на високу швидкодію (робота в режимі реального часу за 2 с.) та правильну (величина оцінюючого функціоналу відповідає прийнятому значенню, тобто $E \leq 5 \%$ (див. рис. 5.1) роботу.

Витрачений пропонованою ШНМ автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання час на обробку вимірювальної інформації є значно меншим порівняно із часом, що витрачався при застосуванні інших методів для визначення складових похибок вимірювання, зокрема при застосуванні дисперсійного аналізу за критерієм Фішера.

Приведене дозволяє стверджувати, що застосування пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання підвищує швидкодію пропонованої ППСВК, а також сприяє частковому підвищенню точності в результаті виключення суб'єктивних похибок за рахунок повної автоматизації процесу обробки вимірювальної інформації.

5.3. Експериментальне дослідження похибок функціонування штучної нейронної мережі автоматичного розпізнавання хімічних елементів

Результати експериментального дослідження похибок функціонування пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів представлено у вигляді графіку зміни середньої квадратичної похибки (рис. 5.2).

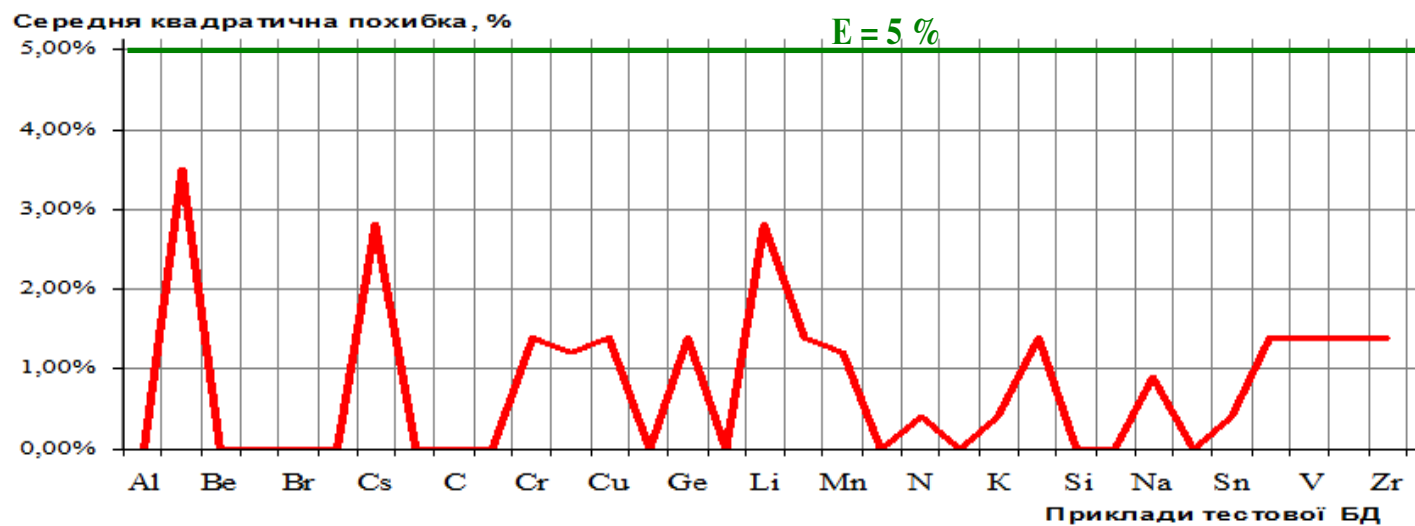


Рис. 5.2. Графік зміни середньої квадратичної похибки виходів пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів за результатами експериментального дослідження її функціонування

Отримані результати можуть бути інтерпретовані наступним чином. Для розпізнавання складових похибок вимірювання побудовано ШНМ з параметрами: кількість нейронів вхідного шару 256, прихованого шару – 275, вихідного шару – 62. При тестуванні ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів величина похибки виходів не перевищує 5%, що вказує на відмінний результат роботи.

Швидкодія роботи пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів для тестових прикладів становить 2,5 с., що відповідає режиму реального часу.

При цьому, необхідно взяти до уваги, що час обробки інформації пропованою ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів у металовмісних матеріалах залежить як від технічних характеристик власне ШНМ (від тактової частоти процесора ПК, розрядності, кількості нейронів прихованого шару ШНМ тощо), так і від розмірності вимірювальної інформації. Зокрема, експериментальні дослідження пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів проводились на ПК з наступними параметрами: процесор – Intel (R) Core (TM) i3-7020U CPU 2,3GHz, ОЗУ 4,00 Гб; тип операційної системи – 64-розрядна операційна система, процесор x64.

Таким чином, результати проведеного комп'ютерного моделювання роботи розробленої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів у металовмісних матеріалах вказують на високу швидкодію (робота в режимі реального часу за 2,5 с.) та правильну (величина оцінюючого функціоналу відповідає прийнятому значенню, тобто $E \leq 5 \%$ (див. рис. 5.2) роботу.

5.4. Фільтрація вихідних сигналів КМОП-матриці за методом ковзних середніх

Фільтрацію вихідних сигналів КМОП-матриці необхідно проводити для підвищення якості амплітуди вихідних сигналів, зокрема для згладжування

амплітуди випадкових складових похибок у вимірному сигналі та підвищення точності вимірювання кутів ППСВК в цілому. З врахуванням того, що вимірні дані є гладкими неперервними функціями, що задаються масивом відліків, то для їх обробки можна використовувати фільтри, принцип дії яких оснований на усередненні декількох сусідніх відліків. При цьому гладкість сигналів пропонованої ППСВК обумовлюється тим, що обертання обертового пристрою на якому жорстко закріплені КЛ (див. розділ 2, п. 2.2.1) здійснюється плавно з постійною швидкістю.

Класичним рішенням в даному випадку є фільтр Калмана, зокрема його окремий випадок – метод ковзного середнього. Метод ковзного середнього зручно застосовувати до даних, що змінюються в час для згладжування короткострокових коливань і виділення основних тенденцій або циклів. Математично ковзне середнє є одним з видів згортки. Метод ковзного середнього володіє низкою наступних переваг, які вигідно відрізняють його від інших, наприклад, методу накопичення, частотної фільтрації, кореляційного методу, узгодженої фільтрації та нелінійної фільтрації. Перевагами ковзного середнього є наступне:

1. Змінна середня дозволяє синтезувати функцію тренда, в найбільшій мірі наближену до значень досліджуваного ряду, оскільки для окремих частин ряду вибирається найкраща тенденція;
2. До досліджуваного ряду можуть бути добавлені нові значення;
3. Знаходження тренда не пов'язане із значними обчислювальними труднощами.

В загальному випадку ковзні середні (англ. moving average – *MA*) обчислюють за відомою формулою [5]:

$$MA_t = \sum_{i=1}^{n-1} w_{t-i} \cdot p_{t-i}, \quad (5.1)$$

де MA_t – значення зваженого ковзного середнього в точці t ;

n – кількість значень вихідної функції для розрахунку ковзного

середнього;

w_{t-1} – ваговий коефіцієнт нормованого значення для $t-i$ -го значення вихідної функції;

p_{t-i} – значення вихідної функції в момент часу, віддалений від поточного на i інтервалів.

Нормування вагових коефіцієнтів полягає у приведенні їх значень до таких величин, що сума всіх дорівнює 1:

$$\sum_{i=1}^{n-1} w_{t-1} = 1. \quad (5.2)$$

Записавши вираз (5.1) з довільними значеннями вагових коефіцієнтів, отримаємо наступний вираз:

$$MA_t = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} W_{t-1} \cdot p_{t-1}}{\sum_{i=1}^{n-1} W_{t-1}}. \quad (5.3)$$

Нормування вагових коефіцієнтів w_{t-1} для $t-i$ -го значення вихідної функції із виразу (5.1) здійснюється за виразом (5.4):

$$w_{t-1} = \frac{W_{t-1}}{\sum_{i=1}^{n-1} W_{t-1}}. \quad (5.4)$$

Значення w_{t-1} як правило приймають рівним 1 (у випадку простого (арифметичного) ковзного середнього) або надають значення із формальних рядів (у випадку зваженого ковзного середнього), наприклад, арифметичної прогресії або експоненціальна функція.

Для даного випадку, коли вимірювальні дані ППСВК є гладкими неперервними функціями часових рядів та задаються масивом відліків, доцільно застосовувати зважене ковзне середнє, тому значення w_{t-1} приймаються із формальних рядів арифметичної прогресії.

Зважене ковзне середнє (англ. weighted moving average – WMA) ковзне

середнє, при обчисленні якого значення ваги w_{t-1} кожного n члена вихідної функції, починаючи з найменшого, дорівнює відповідному члену арифметичній прогресії. Тобто при обчисленні WMA для часового ряду, вважають, що останні значення вихідної функції є більш значущими ніж попередні, причому функція значущості лінійно спадає.

Зважене ковзне середнє для арифметичної прогресії з початковим значенням та кроком рівним 1 обчислюється за виразом (5.5):

$$\begin{aligned} WMA_t &= \frac{n \cdot p_t + (n-1) \cdot p_{t-1} + \dots + (n-i) \cdot p_{t-i} + \dots + 2 \cdot p_{t-n} + 1 \cdot p_{t-n+1}}{n + (n-1) + \dots + (n-i) + \dots + 2 + 1} = \\ &= \frac{2}{n \cdot (n+1)} \sum_{i=0}^{n-1} (n-i) \cdot p_{t-i}, \end{aligned} \quad (5.5)$$

де WMA_t – значення зваженого ковзного середнього в точці t ;

n – кількість значень вихідної функції для розрахунку ковзного середнього;

p_{t-i} – значення вихідної функції в момент часу t , віддалений від поточного на i інтервалів.

Алгоритм роботи фільтра сигналів у пропонованій ППСВК за методом ковзного середнього може бути представлений блок-схемою за рис. 5.3.

Реалізація фільтра сигналів за методом ковзного середнього здійснюється програмно на мові програмування MATLAB з використанням функції *smooth* середовища математичного моделювання MATLAB.

Графічне представлення результатів спостереження при багаторазових вимірюваннях кутів, зокрема 24-гранної призми, до фільтрації та після фільтрації за методом ковзного середнього приведено на рис. 5.4 – рис. 5.6 відповідно.

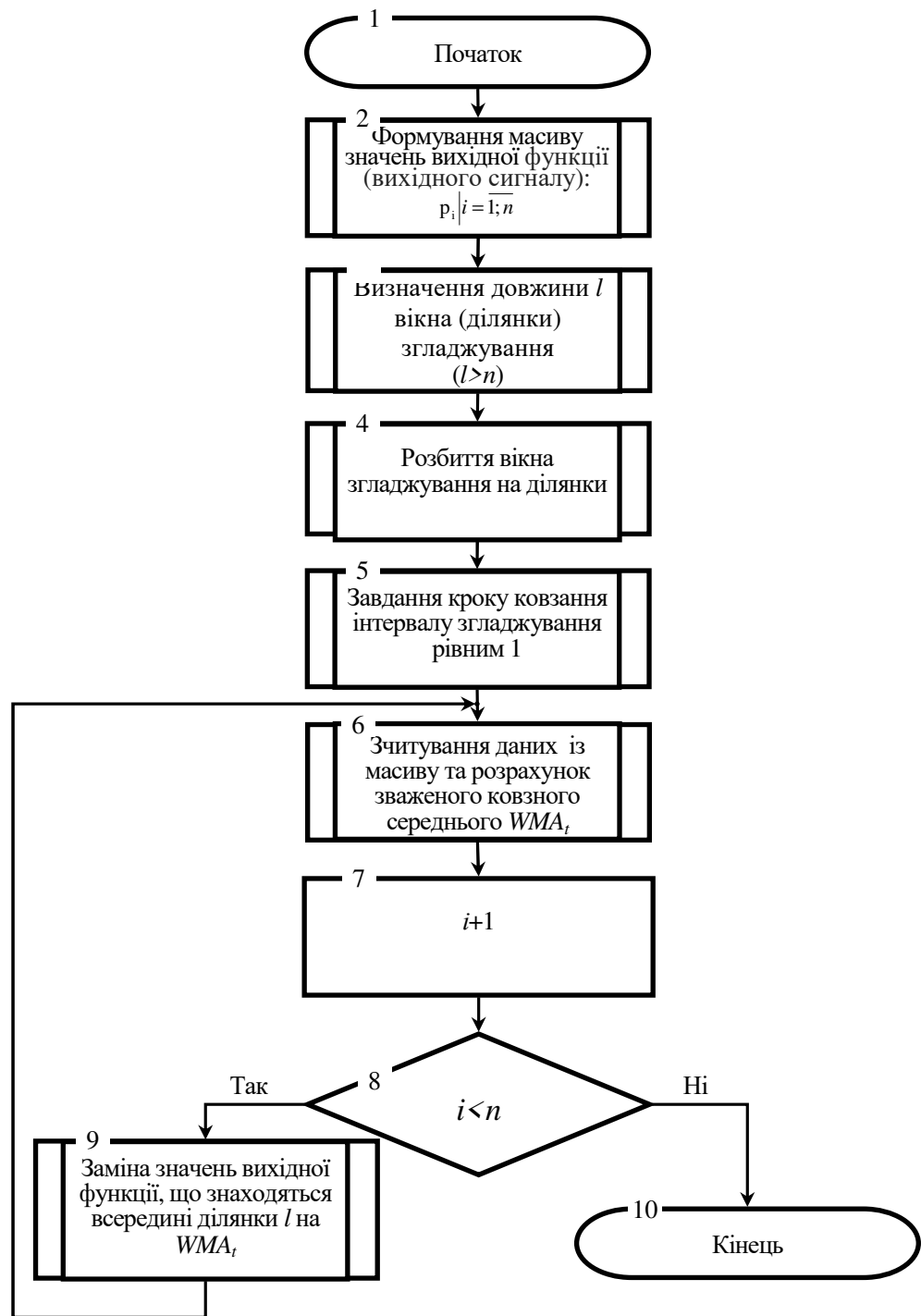


Рис. 5.3. Блок-схема алгоритму роботи фільтра сигналів у пропонуваній ППСВК за методом ковзного середнього

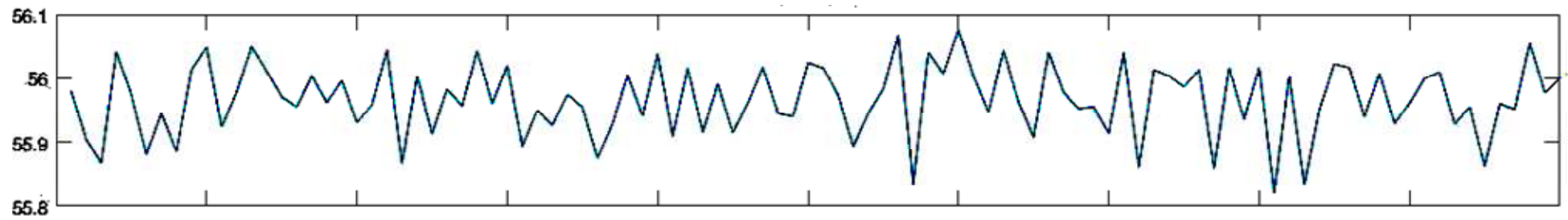


Рис. 5.4. Спотворення результатів спостереження при багаторазових вимірюваннях кутів через наявність випадкових похибок

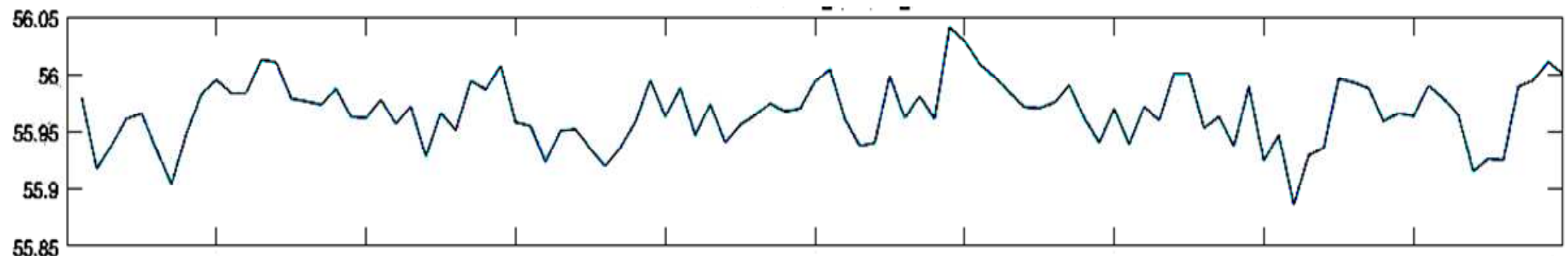


Рис. 5.5. Графік зміни результатів спостереження після першого етапу фільтрації

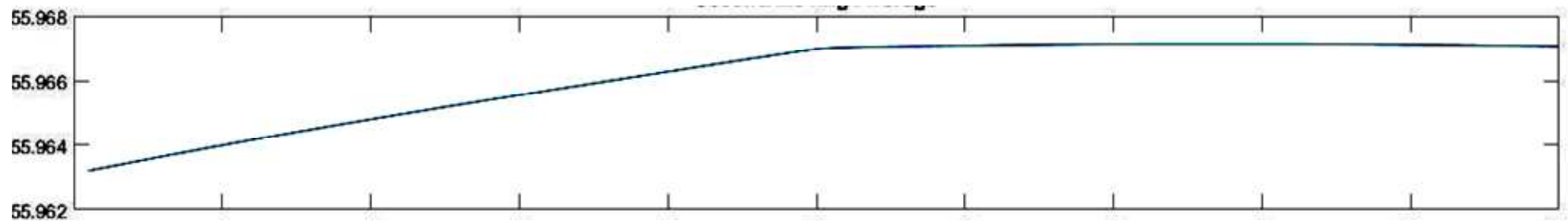


Рис. 5.6. Графік зміни результатів спостереження після другого етапу фільтрації

5.5. Опис алгоритму функціонування пропонованої прецизійної приладової системи вимірювання кутів

Для автоматизації функціонування пропонованої ППСВК, пришвидшення процесу вимірювання та обробки інформації, а також забезпечення підвищення швидкодії та точності отримання кінцевих результатів розроблено алгоритм програмно-апаратного комплексу прецизійного вимірювання кутів та визначення хімічного складу металовмісних матеріалів (ПАК-ПВК-ХСМ), блок-схема якого приведена на рис. 5.7 та рис. 5.8. Пропонований ітераційний алгоритм ПАК-ПВК-ХСМ виступає основою розробленого програмного забезпечення функціонування пропонованої ППСВК.

Робота пропонованого алгоритму ПАК-ПВК-ХСМ починається із ініціалізації системи керування та основних апаратних компонентів підсистеми ПВК пропонованої ППСВК (див. розділ 2) (блок 2), ініціалізації та запуску програмного комплексу підсистеми ПВК пропонованої ППСВК та задавання точності статистичної вибірки (блок 3), ініціалізації КМОП-матриці ППВК (блок 4), ініціалізації нейромережевого блоку обробки сигналів (блок 5). Після ініціалізації основних компонентів виконується вибір режиму роботи: вимірювання кутів (блок 6) або аналізу хімічного складу металовмісних матеріалів (блок 7).

При виборі режиму вимірювання кутів з КМОП-матриці отримується сигнал (блок 14), що відображає величину вимірюного кута. Даний сигнал передається до ШНМ де виконується аналіз похибок вимірювання (блок 15). Виконується перевірка наявності систематичної складової похибки вимірювання (блок 16). У разі наявності систематичної складової похибки вимірювання виконується розрахунок її величини та поправки (блок 17) для її подальшої компенсації. Відсутність систематичної складової похибки вимірювання означає наявність випадкової складової для оцінки величини якої визначається необхідна кількість спостережень (блок 18), що достатня для досягнення заданої точності статистичної вибірки. У відповідності до визначеної кількості спостережень виконуються багаторазові вимірювання (блок 19) та фільтрація отриманих результатів (блок 20).

Після фільтрації результатів вимірювання виконується статистична обробка отриманих даних (блок 21) та візуалізація результатів (блок 22).

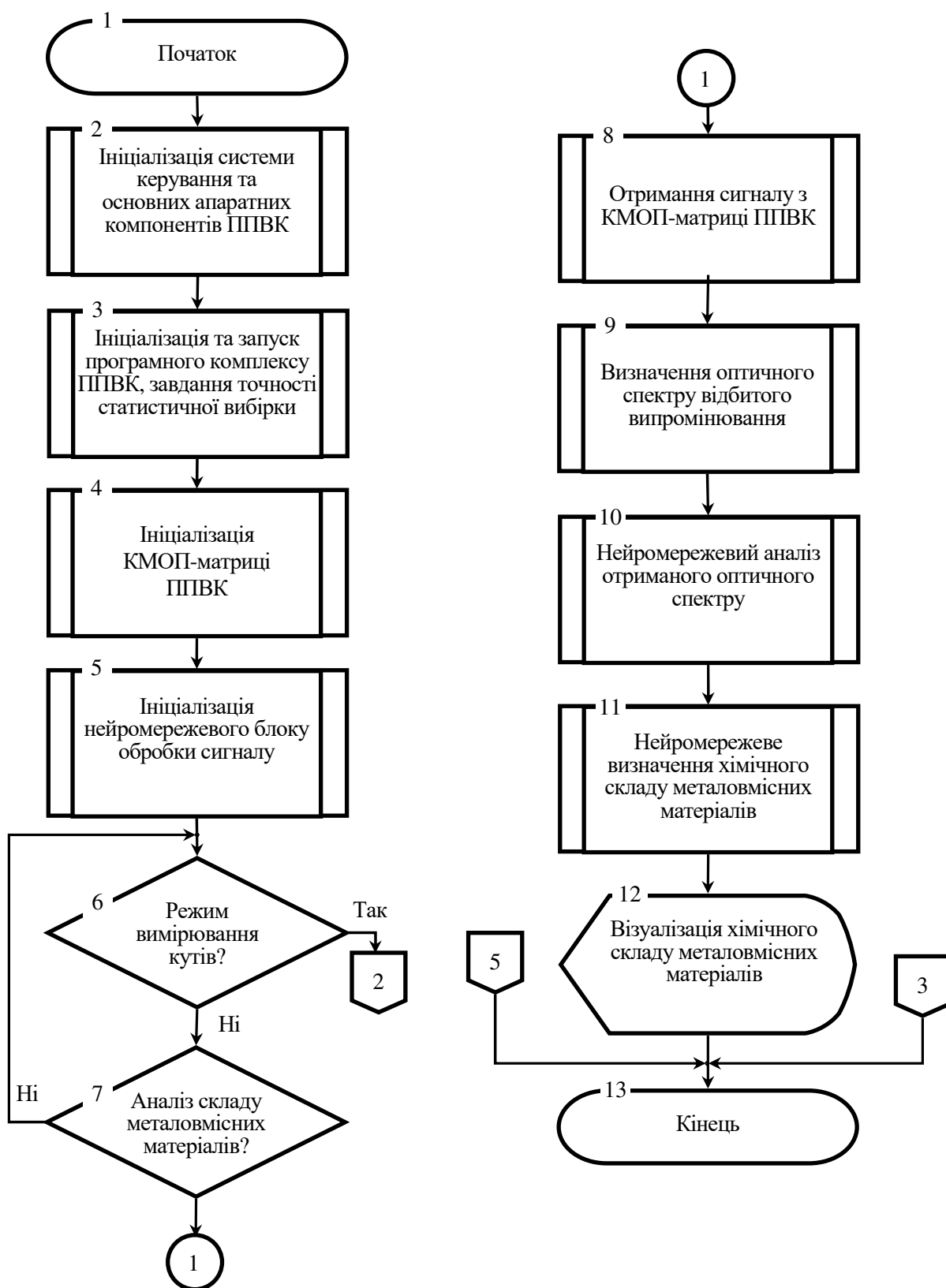


Рис. 5.7. Блок-схема пропонованого алгоритму ПАК-ПВК-ХСМ функціонування пропонованої ППСВК (початок)

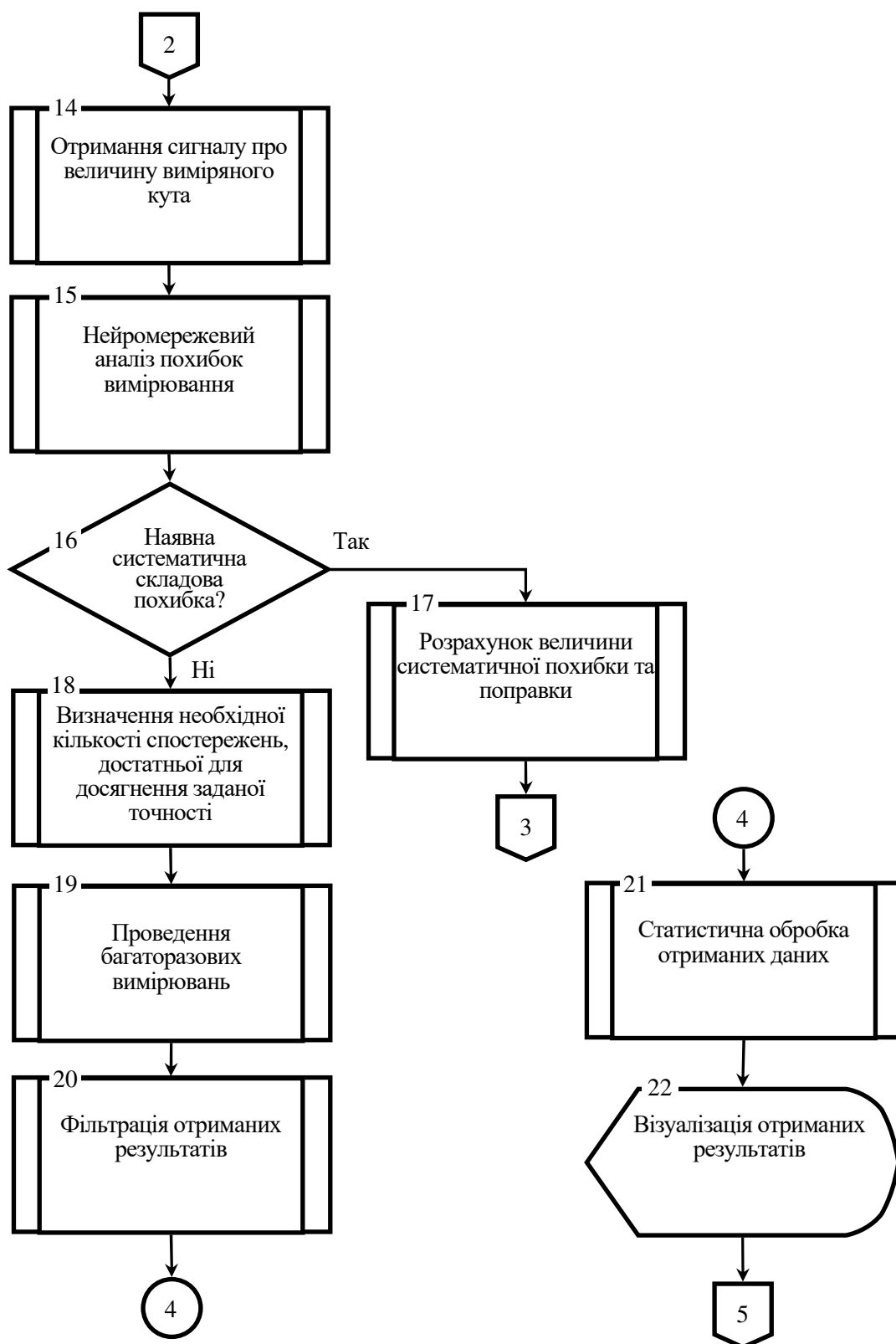


Рис. 5.8. Блок-схема пропонованого алгоритму ПАК-ПВК-ХСМ функціонування пропонованої ППСВК (закінчення)

Отримані результати можуть бути виведені (блок 6), наприклад, на екран монітора комп'ютера.

У блоці 8 виконується отримання сигналу з КМОП-матриці підсистеми

ПВК пропонуваної ППСВК. У блоці 9 виконується визначення оптичного спектру відбитого випромінювання. Отриманий спектр аналізується за допомогою ШНМ (блок 10) та визначається хімічний склад металовмісних матеріалів (блок 11). У блоці 12 виконується візуалізація визначеного хімічного складу матеріалів.

5.6. Опис програмного забезпечення функціонування пропонуваної прецизійної приладової системи вимірювання кутів

Пропонований алгоритм ПАК-ПВК-ХСМ функціонування розробленої ППСВК виступає підґрунтям щодо розробки відповідного програмного забезпечення (ПЗ) GSoft для автоматизації функціонування пропонуваної ППСВК. Розроблене ПЗ GSoft – це сукупність програм системи обробки інформації і програмних документів, необхідних для експлуатації цих програм [12, 13]. Програмний продукт – програмний засіб, програмне забезпечення, які призначені для постачання користувачеві (покупцеві, замовникові) [14, 15, 16]. При цьому розрізняють системне ПЗ (зокрема, операційна система, транслятори, редактори, графічний інтерфейс користувача) та прикладне ПЗ, що використовується для виконання конкретних завдань, наприклад, програмне забезпечення проведення програмної точнісної атестації РЗ ПР. ПЗ є одним з видів забезпечення обчислювальної системи поряд з технічним (апаратним), математичним, інформаційним, лінгвістичним, організаційним і методичним забезпеченням. [17]. Крім цього, не останнього значення набуває включення до складу програмних засобів зручного, інтуїтивно-зрозумілого графічного інтерфейсу користувача (Graphical User Interface – GUI), головною задачею якого є забезпечення наочного, як правило, двонаправленого обміну даними (діалогу) між користувачем та програмою [17].

ПЗ GSoft розроблено для функціонування пропонуваної ППСВК та забезпечує можливість її використання в автоматизованому режимі для вимірювання кутів з підвищеною точністю та швидкодією. Пропоноване ПЗ GSoft функціонує у відповідності до розробленого алгоритмічного забезпечення функціонування пропонуваної ППСВК (див. п. 5.4). Структурну схему функціонування розробленого ПЗ GSoft приведено на рис. 5.9.

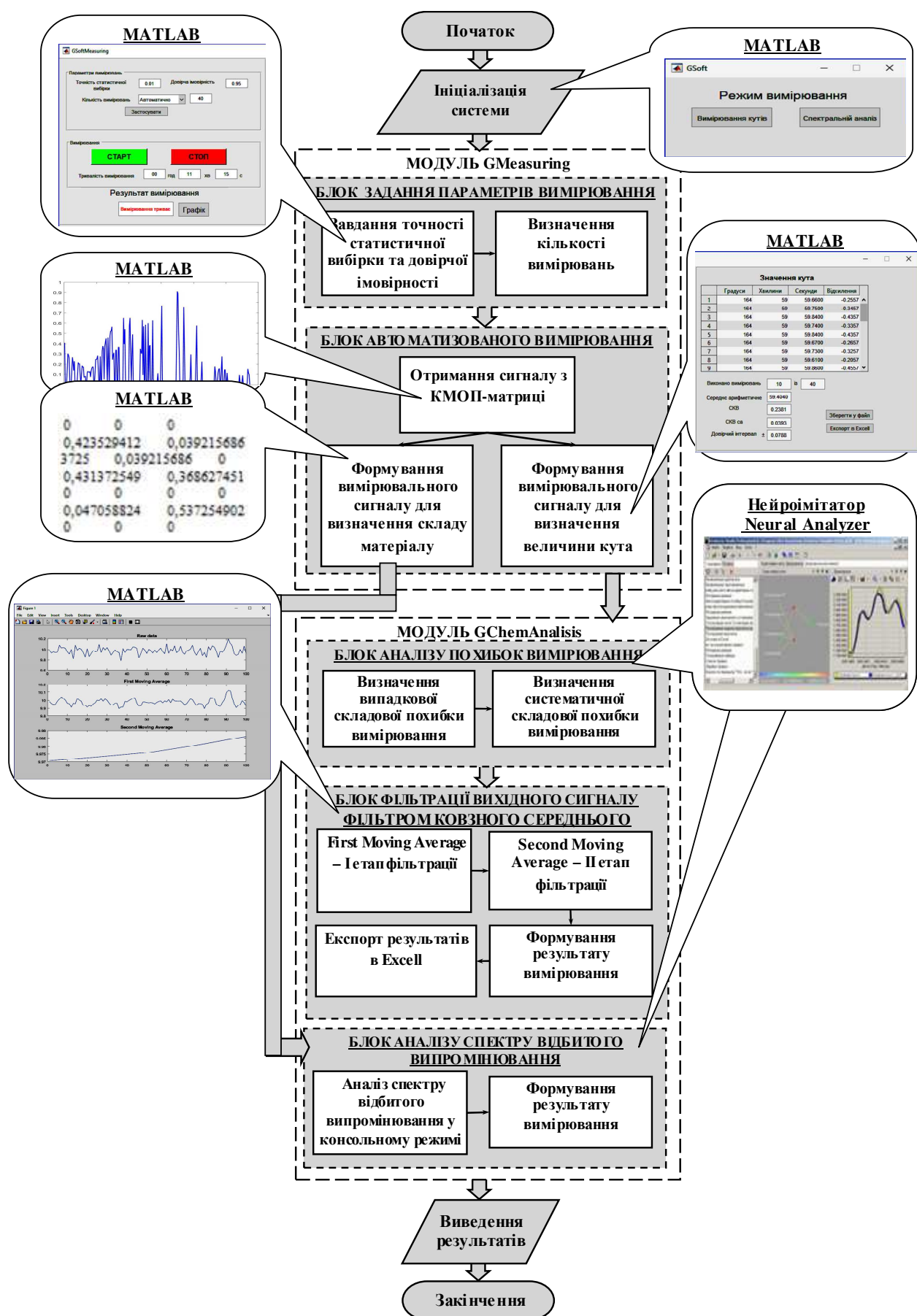


Рис. 5.9. Структурна схема функціонування ПЗ GSoft

Пропоноване ПЗ GSoft являє собою комплекс прикладних засобів та об'єднує низку розроблених програмних модулів (зокрема, модулі GMeasuring, GChemAnalysis), що реалізовані на мові програмування MATLAB, яка є надбудовою однойменного середовища математичного моделювання, а також комплекс готових прикладних програм, що надають можливості роботи із ШНМ. Зокрема використовуються можливості аналітичного пакета Deductor Professional (Lite-версії), що містить нейромодулятор Neural Analyzer, який призначений для роботи із ШНМ та табличний процесор MS Excel.

Пропоноване ПЗ GSoft реалізовано за модульним принципом та за допомогою графічного інтерфейсу користувача – GUI дозволяє працювати у двох режимах (рис. 5.10).

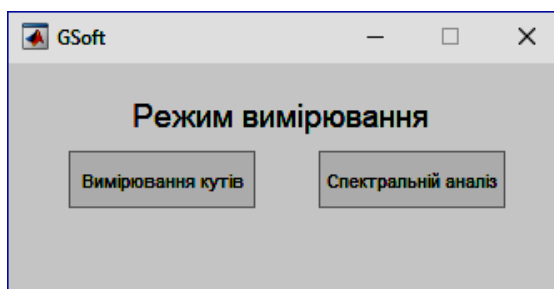


Рис. 5.10. Екранна форма із вибором режиму роботи ПЗ GSoft

При виборі режиму вимірювання кутів завантажується модуль GMeasuring, при цьому завантажується відповідне діалогове вікно (рис. 5.11).

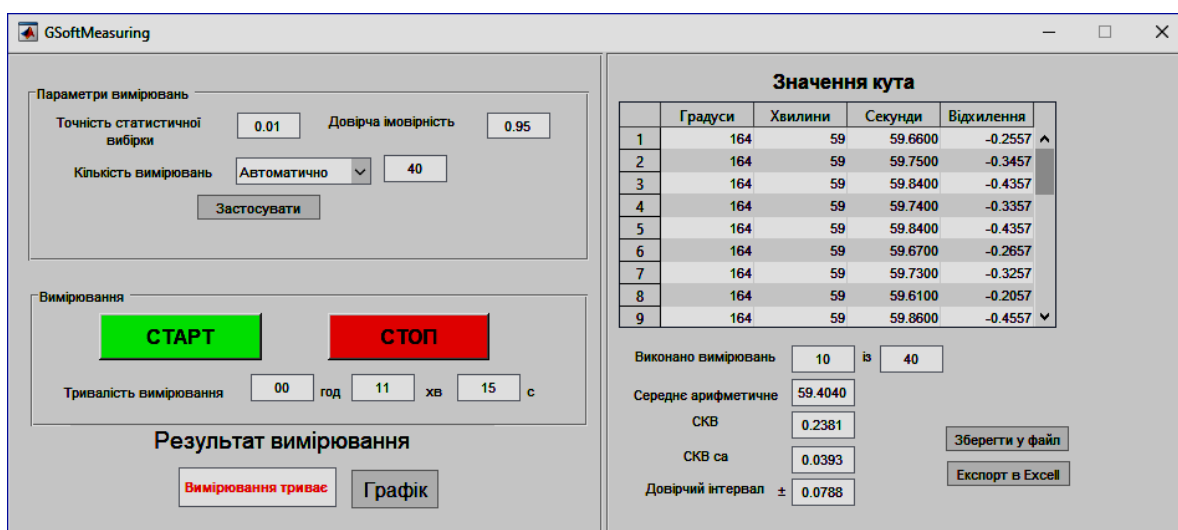


Рис. 5.11. Діалогове вікно модуля GMeasuring

На початку роботи необхідно задати параметри вимірювань, а саме: точність статистичної вибірки, величину довірчої імовірності та кількість вимірювань. Останнє може бути задана у ручну або розрахована автоматично відповідно до наведеного вище критерію Фішера. Після налаштування параметрів вимірювань необхідно натиснути кнопку “СТАРТ”. Натискання вказаної кнопки активує апаратну частину ППСВК та канал передачі даних. Протягом роботи ПЗ відбувається фіксація часу вимірювання та неперервний аналіз даних. Отримані результати заносяться до таблиці “Значення кута”, де представляються у форматі: градуси, хвилини, секунди та відхилення ($\Delta_k = \varphi_{ca} - \varphi_k$) у секундах. Також при аналізі результатів обчислюються: середнє арифметичне φ_{ca} , середнє квадратичне відхилення (СКВ) виміряних значень кута від середнього арифметичного (дійсного значення кута), СКВ дійсного значення кута від істинного (математичного очікування) та довірчий інтервал результату вимірювання. Зміна результатів вимірювання візуалізується у вигляді графіку (рис.5.12).

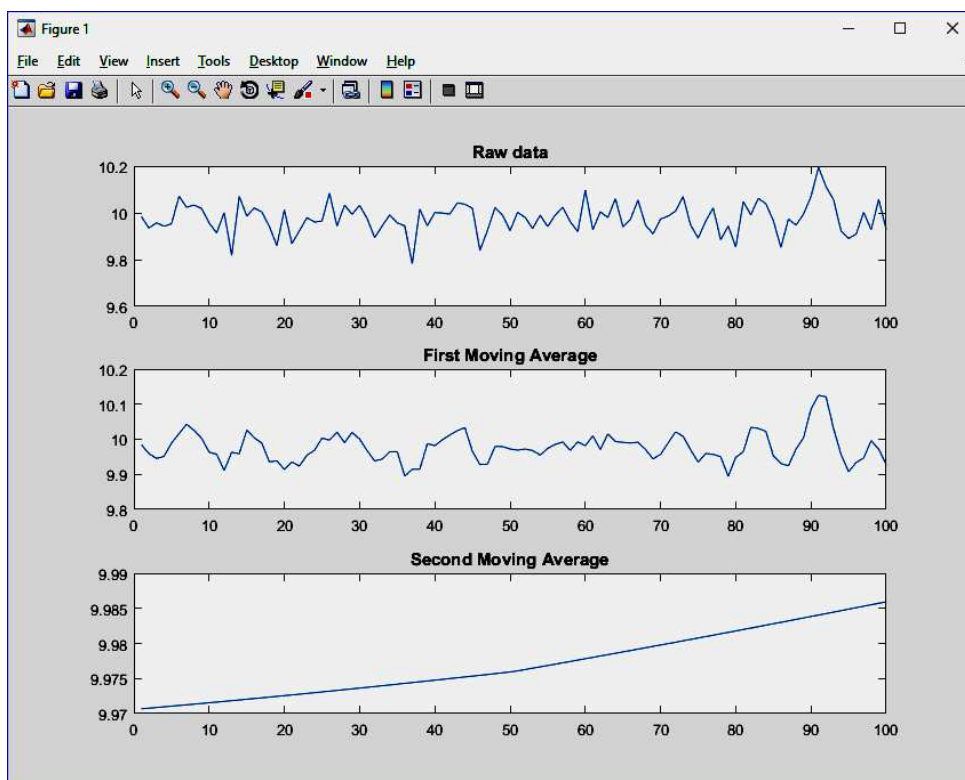


Рис. 5.12. Візуалізація результатів вимірювання при вимірюванні кута 10°

Представлені на рис. 5.12 графіки ілюструють зміну результатів вимірювання в часі (Raw data), результат фільтрації дослідних даних на першому (First Moving Average) та другому (Second Moving Average) етапах після першого та другого проходу відповідно фільтром ковзного середнього.

При натисканні на кнопку “Зберегти у файл” з’явиться діалогове вікно що дозволяє зберегти отримані результати, а при натисканні на “Експорт в Excell” отримані результати можна зберегти у форматі .xls та .xlsx, що забезпечує передачу даних до сторонніх програмних продуктів.

При виборі режиму “Спектральний аналіз” запускається модуль GChemAnalysis, сигнал з КМОП-матриці надходить на вхід ШНМ, яка виконує аналіз спектру відбитого випромінювання у консольному режимі та виводить результат – склад металовмісних матеріалів.

ПЗ GSoft може функціонувати при невисоких вимогах до апаратної частини ПК під керуванням операційних систем (ОС) сімейства MS Windows 9x/NT/2000/XP (або більш сучасних), а також UNIX-like ОС, зокрема Linux, Solaris тощо, а також Mac OS. Розроблене програмне забезпечення може бути використано в якості додаткового інструментарію в комплекті з MATLAB або інсталюватись окремо без обов’язкових вимог до наявності цього середовища.

Зокрема, для роботи розробленого програмного модулю GMeasuring ПЗ GSoft достатньо персонального комп’ютера (ПК) з архітектурою, сумісною з Intel x86/64. Мінімальна конфігурація апаратної частини ПК визначається вимогами ОС. Проте необхідно мати на увазі, що математичний апарат, реалізований у ПЗ GSoft, вимагає проведення нейромережевого аналізу даних. Тому від швидкодії процесора та об’єму оперативної пам’яті ПК безпосередньо залежить швидкість роботи програми. В зв’язку з цим для комфортної роботи можна висунути наступні мінімальні апаратні вимоги до ЕОМ: ОС Windows XP SP3, процесор – Intel Core2Duo 6300 1.86 GHz, ОЗУ – 2048 Mb, не менше 2 Gb вільного простору на HDD, CD-ROM.

Висновки до розділу 5

1. Шляхом комп’ютерного моделювання проведено експериментальні

дослідження працездатності пропонованих ШНМ, зокрема, досліджено похибки їх функціонування та визначено швидкодію.

2. Проведено експериментальне дослідження похибок функціонування пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання, отримані середні квадратичні значення похибок E виходів пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання не перевищують 5 %, що вказує на правильність її роботи.

3. Проведено експериментальне дослідження похибок функціонування пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів у складі металовмісних матеріалів, отримані середні квадратичні значення похибок E виходів пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання не перевищують 5 %, що вказує на правильність її роботи.

4. Визначено швидкодію пропонованих ШНМ автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання та ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів у складі металовмісних матеріалів, яка складає 2 с. та 2,5 с. відповідно, що є відмінним результатом та відповідає режиму реального часу.

5. Виконано фільтрацію вихідних сигналів КМОП-матриці за методом ковзного середнього для зменшення випадкових складових похибок вимірювання та підвищення якості вихідного сигналу пропонованої ППСВК.

6. Розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення функціонування пропонованої ППСВК з використанням нейроімітатора, середовища математичного моделювання та мови програмування MATLAB, що дало можливість автоматизувати функціонування пропонованої ППСВК, пришвидшити процес вимірювання та обробки інформації, а також забезпечити підвищення швидкодії та точності отриманих кінцевих результатів.

Література до розділу 5

1. Черепанська І. Ю. Теорія і принципи побудови автоматизованої системи для лінійних і кутових переміщень об'єктів виробництва з використанням математичного апарату кватерніонів і елементів штучного інтелекту. Монографія / І. Ю. Черепанська, В. А. Кирилович, О. М. Безвесільна, А. Ю. Сазонов. –

Житомир: ЖДТУ, 2016. – 326 с.

2. Черепанська І. Ю. Штучні нейронні мережі при вирішенні задач у технологічних вимірюваннях, приладобудуванні та проектуванні гнучких виробничих систем. Монографія / І. Ю. Черепанська, О. М. Безвесільна, А. Ю. Сазонов, Т. В. Хильченко. – Житомир: ЖДТУ, 2017. – 217 с.

3. Черепанська І. Ю. Штучні нейронні мережі для вирішення задач технологічної підготовки гнучкого виробництва: монографія. Монографія / І. Ю. Черепанська, О. М. Безвесільна, А. Ю. Сазонов. – Київ: ДП “НВЦ “Пріорітети”, 2018. – 192 с.

4. Безвесільна О. М. Автоматизований прецизійний пристрій для вимірювання кутів: Монографія. – Житомир: ЖДТУ, 2010. – 258 с.

5. Грешилов А. А., Стакун В. А., Стакун А. А. Математические методы построения прогнозов. – М.: Радио и связь, 1997. – 112 с.

6. Томашевский В. М. Моделювання систем / В. М. Томашевский. – К.: Видавнича група BHV, 2005. – 352 с.

7. Безвесільна О. М. Методи оптимізації цільової функції та ідентифікації характеристик прецизійних навігаційних систем: Монографія. / О. М. Безвесільна, Ю. В. Киричук, Ю. О. Подчашинський. – Житомир: ЖДТУ, 2010. – 201 с.

8. Irina Cherepanska The procedure for determining the number of measurements in the normalization of random error of an information-measuring system with elements of artificial intelligence / Irina Cherepanska, Elena Bezvesilna, Artem Sazonov, Sergey Nechai, Tatiana Khylichenko // Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2017. – № 5/9 (89). – P. 58 – 67. Індексція *Scopus*.

9. Колкер Я. Д. Математический анализ точности механической обработки деталей / Яков Давидович Колкер – К.: Техника, 1976. – 200 с.

10. Томашевський В. М. Моделювання систем / Томашевський В. М. – К.: Видавнича група BHV, 2005. – 352 с.

11. Федоров Б. Ф. Оптический квантовый гироскоп / Б. Ф. Федоров, А. Г. Шереметьев, В. Н. Умников. – М.: Машиностроение, 1972. – 222 с.

12. Інформаційні ресурси: словник законодавчої та стандартизованої термінології [уклад. Н.І. Рогова та ін.]. – К.: Нілан-ЛТД, 2012. – 284 с.

13. Системи оброблення інформації. Основні поняття. Терміни та визначення: ДСТУ 2938-94. – [Чинний від 1996-01-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 1994. – 35 с. – (Національний стандарт України)

14. Видання електронні. Основні види та вихідні відомості: ДСТУ 7157:2010. – [Чинний від 2010-07-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2010. – 14 с. – (Національний стандарт України).

15. Інформаційні ресурси: словник законодавчої та стандартизованої термінології [уклад. Н.І. Рогова та ін.]. – К.: Нілан-ЛТД, 2012. – 284 с.

16. Україна. Постанова Кабінету Міністрів “Про затвердження загальних вимог до програмних продуктів, які закуповуються та створюються на замовлення державних органів” [Текст]: від 12 серпня 2009 р. №869. – К.: [б.в.], 2010. – 3 с.

17. Сазонов А. Ю. Автоматизація процесу керування точністю позиціонування промислових роботів при синтезі гнучких інтегрованих систем: дис. канд. техн. наук: 05.13.07 “Автоматизація процесів керування” / Артем Юрійович Сазонов. – К.: 2014. – 336 с.

РОЗДІЛ 6. ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КІЛЬЦЕВОГО ЛАЗЕРУ ПРЕЦІЗІЙНОЇ ПРИЛАДОВОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ

6.1. Аналіз похибок кільцевого лазера як складової пропонованої прецизійної приладової системи вимірювання кутів

На даний час накопичений значний досвід розробки КЛ [5, 6, 7, 10, 12, 13, 14, 15, 20, 22, 23, 28] та гоніометричних систем на їх основі [0, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10, 100]. КЛ використовується в якості прецизійного перетворювача кута. Точність сучасних КЛ досить велика, проте реально КЛ характеризується значно більшими похибками. Параметрами КЛ, що визначають його точнісні характеристики та підлягають визначенню є дрейф нуля вихідної характеристики та дрейф масштабного коефіцієнта.

Із літератури [29] відомо, що основними джерелами похибок КЛ є похибки конструктивно-технологічного характеру та похибки обумовлені фізичною природою процесів та явищ, що виникають при функціонуванні КЛ.

Похибки конструктивно-технологічного характеру КЛ є систематичними похибками, що частково або повністю усуваються. Вони обумовлюються вібраціями, зміною температури, коливаннями струму розряду. При цьому на сьогодні накопичений значний досвід, щодо підвищення точності КЛ [0, 2, 3, 4, 5, 7, 18, 18, 20, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28].

Похибки пов'язані зі зміною температури корпусу ЛГ (на якому кріпляться дзеркала резонатора) виникають за рахунок зміни температури навколишнього середовища або температури активного середовища КЛ. Зміна температури корпусу КЛ призводить до деформацій резонатора. Деформація резонатора призводить до зміни довжини периметру і відповідним чином до зміни частоти генерації та зміни втрат, які в значній мірі визначають рівень інтенсивності генерації. Таким чином, деформація резонатора через частоту генерації і втрати змінює вихідну характеристику КЛ. Крім того деформація резонатора впливає на зв'язок зустрічних хвиль за рахунок зміни відстані між розсіювальними центрами і відповідної зміни ефективних коефіцієнтів зв'язку. Частково цей ефект

компенсується при використанні системи мінімізації зони захоплення. Також із деформацією резонатора пов'язана зміна значення дифракційного розщеплення частот зустрічних хвиль, що обумовлено зміщенням елементів конструкції резонатора (діафрагм) щодо зустрічних світлових пучків, що поширюються в резонаторі [29].

Похибки пов'язані із коливаннями струму розряду в активному середовищі описані в літературі [29]. Флуктуації струму розряду викликають коливання інтенсивностей зустрічних хвиль, так як коефіцієнт посилення активного середовища залежить від струму розряду. Оскільки параметри вихідної характеристики КЛ залежать від інтенсивності генерації, коливання струму розряду призводять до похибки ЛГ. У тому випадку, коли активний елемент виконаний у вигляді двох розрядних проміжків, взаємно некорельовані коливання струму розряду в них призводять до флуктуацій зсуву нуля.

Похибки або флуктуації обумовлені фізичною природою процесів та явищ, що виникають при функціонуванні КЛ носять випадковий характер та накладаються на лінійні зміни точнісних параметрів КЛ (дрейфу масштабного коефіцієнту та нуля вихідної характеристики). Вони обумовлюються квантовим характером випромінювання (в основному спонтанного випромінювання) і атомною структурою речовини резонатора, що призводить до виникнення дробового ефекту та дифракції зустрічних хвиль на елементах резонатора, що приводить до коливань довжини резонатора та нестабільності частоти генерації. Вказані випадкові похибки підпорядковують нормальному закону розподілення та описуються Гаусовою кривою.

Дрейф нуля КЛ являє собою частоту вихідного сигналу ЛГ при відсутності вхідної швидкості. Швидкість обертання $\omega_0 = \frac{v_0}{K}$, отримана перерахунком із значення зсуву нуля являє собою уявну (помилкову) швидкість обертання ЛГ. Тобто зсув нуля є частотою вихідного сигналу ЛГ при відсутності вхідної швидкості [29]. З врахуванням того, що вихідна характеристика КЛ це функція залежності частоти $\Delta\nu$ від швидкості обертання ω КЛ, тобто $\Delta\nu=f(\omega)$, де коефіцієнт пропорційності $K = \frac{4S}{\lambda L}$ – масштабний коефіцієнт, графічно це представляється наступним чином (рис. 6.1).

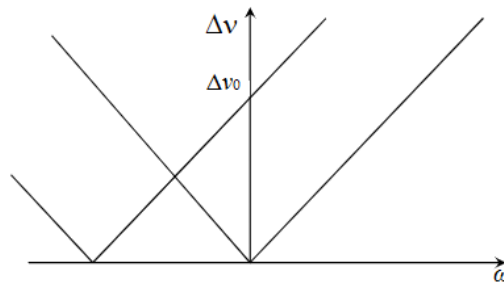


Рис. 6.1. Дрейф нуля вихідної характеристики КЛ

Величину дрейфу нуля ЛГ зазвичай визначають, виставивши вимірювальну вісь ЛГ під певним кутом до осі обертання Землі. Помилка виставки в значній мірі визначає точність вимірювання дрейфу ЛГ. Так, наприклад, у випадку виставки вимірювальної осі ЛГ приблизно ортогонально до осі обертання Землі, помилка виставки в $1'$ призводить до похибки визначення дрейфу в $0,004^\circ/\text{год}$. При виставці вимірювальної осі ЛГ, приблизно паралельно до осі обертання Землі помилка виставки в 1° викликає похибку визначення дрейфу $0,002^\circ/\text{год}$. Тобто при виставці вимірювальної осі КЛ паралельно до осі обертання Землі вимоги до точності виставки значно знижуються [29].

Дрейф нуля КЛ визначають за виразом (3.24) із літератури [29] (див. розділ 3, п. 3.3). Із виразу (3.24) на величину дрейфу окрім конструктивних параметрів КЛ впливає швидкість обертання Землі навколо своєї осі, яка за результатами досліджень приведених в літературі [16, 17] є величиною непостійною $\omega_3 \neq \text{const}$ (див. розділ 3, п. 3.3).

Вплив швидкості обертання Землі навколо своєї осі на роботу КЛ досліджено багатьма науковцями та відображено у роботах [18, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29].

Дрейф масштабного коефіцієнту.

Масштабний коефіцієнт K КЛ, як деякий коефіцієнт пропорційності зміни різницевої частоти Δv в залежності від кутової швидкості обертання КЛ ω визначають за виразами (6.1) або (6.2):

$$K = \frac{4S}{\lambda L}. \quad (6.1)$$

$$K = \frac{2\pi R_{\text{эф}}}{\lambda / 2}, \quad (6.2)$$

де S – площа контуру резонатора;

L – периметр резонатора;

λ – довжина хвилі;

R_{ef} – довжина кола вписаного в оптичний контур резонатора КЛ, $R_{ef} = \frac{2S}{L}$;

$\lambda/2$ – відстань між вузлами стоячої хвилі.

Масштабний коефіцієнт дорівнює числу напівдовжин хвиль генерованого випромінювання, що укладаються на довжині кола, вписаного в оптичний контур.

Для КЛ 3.970.029, розробленого КП СПБ “Арсенал” спільно з кафедрою приладобудування Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, що використовується в пропонованій ППСВК розраховане значення масштабного коефіцієнта становить $K=1,03 \cdot 10^{-5}$ при довжині сторони резонатора КЛ виконаного у вигляді рівностороннього трикутника 22,7 см та довжині хвилі $\lambda=0,6328$ мкм. Проте при роботі КЛ відбувається дрейф масштабного коефіцієнта, що призводить до зміни точності КЛ. В ідеальному випадку масштабний коефіцієнт K змінюється лінійно, але в реальних умовах на лінійні зміни накладаються флуктуації випадкового характеру, наприклад, дробовий та тепловий ефекти обумовлені квантовим характером випромінювання і атомною структурою речовини резонатора. Тому необхідно дослідити зміни масштабного коефіцієнту КЛ застосовуваного у пропонованій ППСВК.

Визначення масштабного коефіцієнту здійснюється шляхом обертання КЛ з постійною швидкістю та вимірювання числа періодів вихідного сигналу за один оберт при обертанні по черзі в протилежних напрямках “за” та “проти” годинникової стрілки та обчисленням за виразом:

$$2\pi K = \frac{1}{2}(N_{2\pi}^+ + N_{2\pi}^-), \quad (6.3)$$

$$\text{де } N_{2\pi}^{\pm} = \int_0^{t_{об}} (\Delta\nu)^{\pm} dt,$$

де $t_{об}$ – час обертуту;

$(\Delta\nu)^{\pm}$ – частота вихідного сигналу при обертанні в напрямках “за” (+) та “проти” (-) годинникової стрілки.

За виразом (6.5) можна визначити величину масштабного коефіцієнта K наступним чином:

$$K = \frac{1}{4\pi} (N_{2\pi}^+ + N_{2\pi}^-). \quad (6.4)$$

Точність масштабного коефіцієнта залежить в основному від точності фіксації проходження кута 2π [рад (оберт)]. При похибці фіксації $1''$ - відносна похибка вимірювання масштабного коефіцієнта становить близько 10^{-6} . Сучасні ЛГ характеризуються відносною нестабільністю масштабного коефіцієнта на рівні $10^{-6} \dots 10^{-7}$.

6.2. Дослідження дрейфу масштабного коефіцієнта кільцевого лазера

Результати дослідження масштабного коефіцієнта кільцевого лазера пропонуваної ППСВК приводяться в [30]. Проте в роботі [30] наведені надто короткі відомості щодо дрейфу масштабного коефіцієнту кільцевого лазера, які не дозволяють скласти повну картину. Тому пропонуються результати отримані проведенням натурного експерименту відповідно до відомої процедури дослідження дрейфу масштабного коефіцієнта, яка приведена в [29, 30] та комп'ютерним моделюванням. Результати комп'ютерного моделювання показали хорошу збіжність із результатами натурного експерименту за роботою [30] та можуть використовуватись для практичних цілей.

Вимірювання масштабного коефіцієнту проводились циклами. За один цикл виконувалось по 5 обертів на кут 2π “за” та “проти” годинникової стрілки. Загальна кількість циклів дорівнює 50. Кутова швидкість обертання поворотного пристрою з КЛ $\omega = 90^\circ/\text{с}$. При цьому враховувався вплив швидкості обертання Землі навколо своєї осі (рис. 6.4). Так вимірювання виконувались на географічній широті місця вимірювання $\Psi = 50^\circ 27'$ півн. ш. (м. Київ), час одного оберту “за” та “проти” годинникової стрілки однаковий та становить 4 с: $t^+ = t^- = t = 4 \text{ с}$.

За кожний оберт КЛ визначалась кількість періодів сигналу КЛ. За один оберт кільцевого лазера “за” та “проти” годинникової стрілки на кут 2π на його виході отримана кількість періодів, відповідно до відомих виразів [30]:

$$N_{2\pi}^+ = K\omega_{2\pi}^+ + K\omega_3 \cos \Psi_{2\pi} + v_0 t^+; \quad (6.5)$$

$$N_{2\pi}^- = K\omega_{2\pi}^- - K\omega_3 \cos \Psi_{2\pi} - v_0 t^-, \quad (6.6)$$

де $N_{2\pi}^+$, $N_{2\pi}^-$ – кількість періодів сигналу КЛ за один оберт кільцевого лазера

“за” та “проти” годинникової стрілки відповідно на кут 2π ;

$\omega_{2\pi}^+$, $\omega_{2\pi}^-$ – кутова швидкість поворотного пристрою “за” та “проти”

годинникової стрілки відповідно;

ω_3 – кутова швидкість обертання Землі навколо своєї осі;

t^+ , t^- – час обертання поворотного пристрою на кут 2π при повороті “за”

та “проти” годинникової стрілки відповідно;

$\Psi_{2\pi}$ – географічна широта місця проведення вимірювання;

v_0 – зсув нуля вихідної характеристики КЛ.

Повороти поворотного пристрою з КЛ реєструвалися щільним фотоелектричним автоколіматором з фокусною відстанню 1000 мм, встановленим на нерухомій опорі, та відбиваючого елемента (дзеркала), встановленого на поворотному пристрої. Очевидно, що в такому випадку до похибки визначення дрейфу масштабного коефіцієнту КЛ буде додаватись похибка автоколіматора а також нестабільність швидкості обертання поворотного пристрою через наявність тертя в опорах, нестабільність роботи електропривода тощо. Тому за рекомендаціями наведеними в літературі [29] необхідно обчислювати середнє значення періодів сигналу $\bar{N}_{2\pi}^+$ та $\bar{N}_{2\pi}^-$ від КЛ за 5 обертів поворотного пристрою при обертанні “за” та “проти” годинникової стрілки відповідно. Сумарне середнє значення періодів сигналу становить:

$$N_{\Sigma} = \bar{N}_{2\pi}^+ + \bar{N}_{2\pi}^-. \quad (6.7)$$

Отримані значення N_{Σ} періодів сигналу за кожний з 50 циклів при швидкості обертання поворотного пристрою з КЛ $\omega = 90^\circ/\text{с}$ приведені в табл. 6.1. Варто вказати, що окрім похибки автоколіматора, нестабільності швидкості обертання поворотного пристрою через наявність тертя в опорах та нестабільності роботи електропривода до похибки визначення дрейфу масштабного коефіцієнту КЛ

буде додаватись нестабільність швидкості обертання Землі. В табл. 6.1 та на рис. 6.4 приведено сумарне середнє значення періодів сигналу за 50 циклів при швидкості обертання поворотного пристрою з КЛ $\omega = 90^\circ/\text{с}$ без врахування зміни швидкості обертання Землі навколо своєї осі, а на рис. 6.5 з врахуванням зміни швидкості обертання Землі. На рис. 6.6 приведено зведений графік значень сумарного середнього значення періодів сигналу за 50 циклів при швидкості обертання поворотного пристрою з КЛ $\omega = 90^\circ/\text{с}$ з / без врахування зміни швидкості обертання Землі навколо своєї осі.

Таблиця 6.1

Сумарне середнє значення періодів сигналу за кожний з 50 циклів при швидкості обертання поворотного пристрою з КЛ $\omega = 90^\circ/\text{с}$, з / без врахування зміни швидкості обертання Землі

№ циклу	N'_Σ , Гц з врахуванням зміни швидкості обертання Землі	N_Σ , Гц без врахування зміни швидкості обертання Землі	$\Delta = N_\Sigma - N'_\Sigma$
1	233,3748	233,7705	0,395705
2	233,35269	233,770392	0,41770392
3	233,33058	233,770284	0,43970284
4	233,30848	233,770185	0,46170185
5	233,29653	233,77023	0,4737023
6	233,29453	233,77023	0,4757023
7	233,29653	233,77023	0,4737023
8	233,30753	233,77023	0,4627023
9	233,31442	233,770122	0,45570122
10	233,31831	233,770014	0,45170014
11	233,31421	233,769906	0,45569906
12	233,3071	233,769798	0,46269798
13	233,31308	233,76978	0,4566978
14	233,31299	233,76969	0,4566969
15	233,31278	233,769474	0,45669474
16	233,31767	233,769366	0,45169366
17	233,30077	233,769258	0,46849258
18	233,29884	233,76915	0,470313559
19	233,29691	233,769042	0,472134538
20	233,29498	233,768934	0,473955516
21	233,29305	233,768826	0,475776495
22	233,29112	233,768718	0,477597474
23	233,28919	233,76861	0,479418453
24	233,28726	233,768502	0,481239432
25	233,28455	233,767602	0,483052491
26	233,28447	233,7675257	0,483051727
27	233,29351	233,7674494	0,47394067
28	233,2844	233,7674494	0,483050964

Закінчення табл. 6.1

29	233,27662	233,7672967	0,490672967
30	233,27455	233,7672204	0,492672204
31	233,28417	233,7672204	0,483048675
32	233,2724	233,7670678	0,494670678
33	233,27232	233,7669914	0,494669914
34	233,28395	233,7669914	0,483046385
35	233,29017	233,7668388	0,476668388
36	233,30194	233,7667625	0,464823507
37	233,30186	233,7666862	0,464822744
38	233,28994	233,7666098	0,476666098
39	233,28987	233,7665335	0,476665335
40	233,28979	233,7664572	0,476664572
41	233,28079	233,7664572	0,485664572
42	233,28864	233,7663046	0,477663046
43	233,28357	233,7662282	0,482662282
44	233,28649	233,7661519	0,479661519
45	233,28441	233,7660756	0,481660756
46	233,28434	233,7659993	0,481659993
47	233,29326	233,765923	0,47265923
48	233,29619	233,7658466	0,469658466
49	233,28711	233,7657703	0,478657703
50	233,28411	233,7657703	0,481657703

Масштабний коефіцієнт КЛ відповідно до приведеного в [30] оцінено за виразом:

$$K = \frac{\overline{N}_+ + \overline{N}_-}{4\pi}. \quad (6.8)$$

Оцінка масштабного коефіцієнту проводилась з рахуванням та без врахування зміни швидкості обертання Землі навколо своєї осі. Отримані результати приведені в табл. 6.2 та на рис. 6.6, рис. 6.7. Із графіків на рис. 6.6, рис. 6.7 видно, що зміна швидкості обертання Землі має вплив на роботу КЛ та може призводити до суттєвих значень похибок вимірювання кутів. Тому, як вказувалось вище, для зменшення / компенсації похибки, що виникає від впливу зміни швидкості обертання Землі необхідно при вимірюваннях встановлювати КЛ таким чином, щоб вісь обертання КЛ була паралельна осі обертання Землі. Тобто, щоб кут $\gamma_{\text{КЛ-З}}$ відхилення осі обертання КЛ та осі обертання Землі прямував до нуля: $\gamma_{\text{КЛ-З}} \rightarrow 0$.

Лінійний дрейф масштабного коефіцієнта КЛ становить близько 0,01361 пер/с та обумовлює похибку вимірювання кутів не більше 0, 1".

Таблиця 6.2

Значення масштабного коефіцієнту для кожного з 50 циклів при швидкості обертання поворотного пристрою $\omega = 90^\circ/\text{с}$ без / з врахуванням зміни швидкості обертання Землі

№ циклу	Значення масштабного коефіцієнту $K \cdot 10^6$, пер/с	Значення масштабного коефіцієнту з врахуванням зміни швидкості обертання Землі $K \cdot 10^6$, пер/с	Δ , пер/с
1	2,59745	2,59478333	0,00266667
2	2,597449	2,59478213	0,00266687
3	2,597448	2,59478093	0,00266707
4	2,597447	2,59477983	0,00266717
5	2,597447	2,59478033	0,00266667
6	2,597447	2,59478033	0,00266667
7	2,597447	2,59478033	0,00266667
8	2,597447	2,59478033	0,00266667
9	2,597446	2,59477913	0,00266687
10	2,597445	2,59477793	0,00266707
11	2,597443	2,59477673	0,00266627
12	2,597442	2,59477553	0,00266647
13	2,597442	2,59477533	0,00266667
14	2,597441	2,59477433	0,00266667
15	2,597439	2,59477193	0,00266707
16	2,597437	2,59477073	0,00266627
17	2,597436	2,59476953	0,00266647
18	2,597435	2,59476833	0,00266667
19	2,597434	2,59476713	0,00266687
20	2,597433	2,59476593	0,00266707
21	2,597431	2,59476473	0,00266627
22	2,59743	2,59476353	0,00266647
23	2,597429	2,59476233	0,00266667
24	2,597428	2,59476113	0,00266687
25	2,597418	2,59475113	0,00266687
26	2,597417	2,59475029	0,00266671
27	2,597416	2,59474944	0,00266656
28	2,597416	2,59474944	0,00266656
29	2,597414	2,59474774	0,00266626
30	2,597414	2,59474689	0,00266711
31	2,597414	2,59474689	0,00266711
32	2,597412	2,5947452	0,0026668
33	2,597411	2,59474435	0,00266665
34	2,597411	2,59474435	0,00266665
35	2,597409	2,59474265	0,00266635
36	2,597408	2,59474181	0,00266619
37	2,597408	2,59474096	0,00266704
38	2,597407	2,59474011	0,00266689
39	2,597406	2,59473926	0,00266674
40	2,597405	2,59473841	0,00266659
41	2,597405	2,59473841	0,00266659
42	2,597403	2,59473672	0,00266628
43	2,597403	2,59473587	0,00266713
44	2,597402	2,59473502	0,00266698
45	2,597401	2,59473417	0,00266683
46	2,5974	2,59473333	0,00266667
47	2,597399	2,59473248	0,00266652
48	2,597398	2,59473163	0,00266637
49	2,597397	2,59473078	0,00266622
50	2,597397	2,59473078	0,00266622

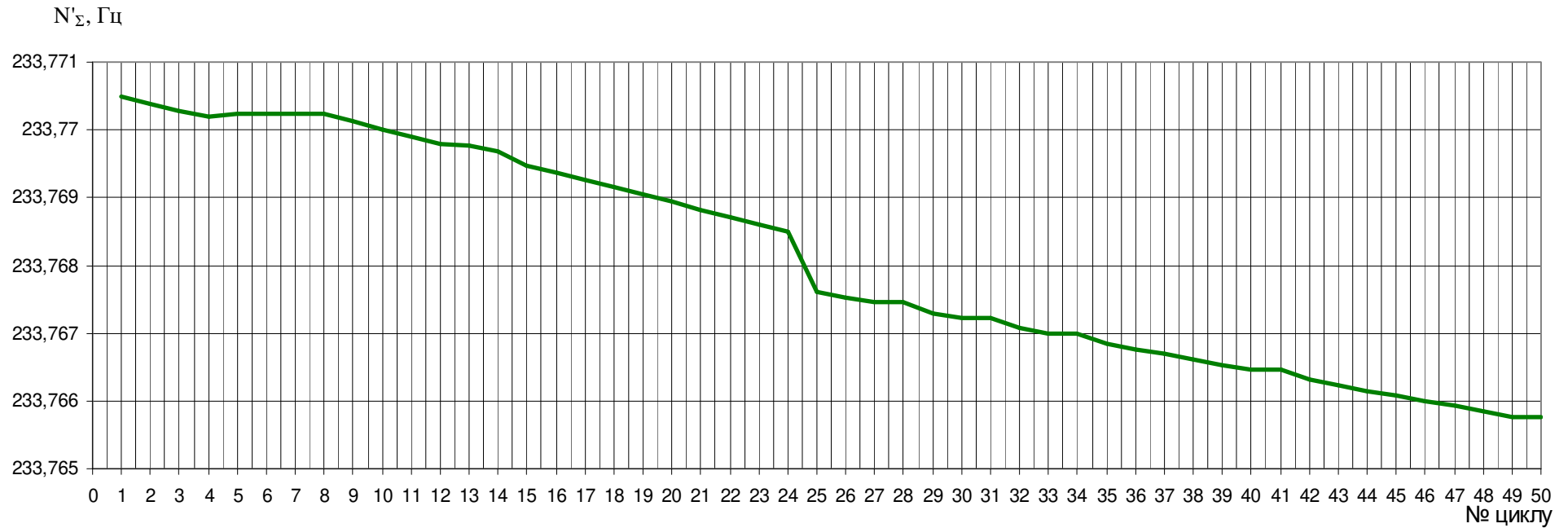


Рис. 6.2. Сумарне середнє значення періодів сигналу за 50 циклів при швидкості обертання поворотного пристрою з КЛ
 $\omega = 90^\circ/\text{с}$ без врахування зміни швидкості обертання Землі навколо своєї осі

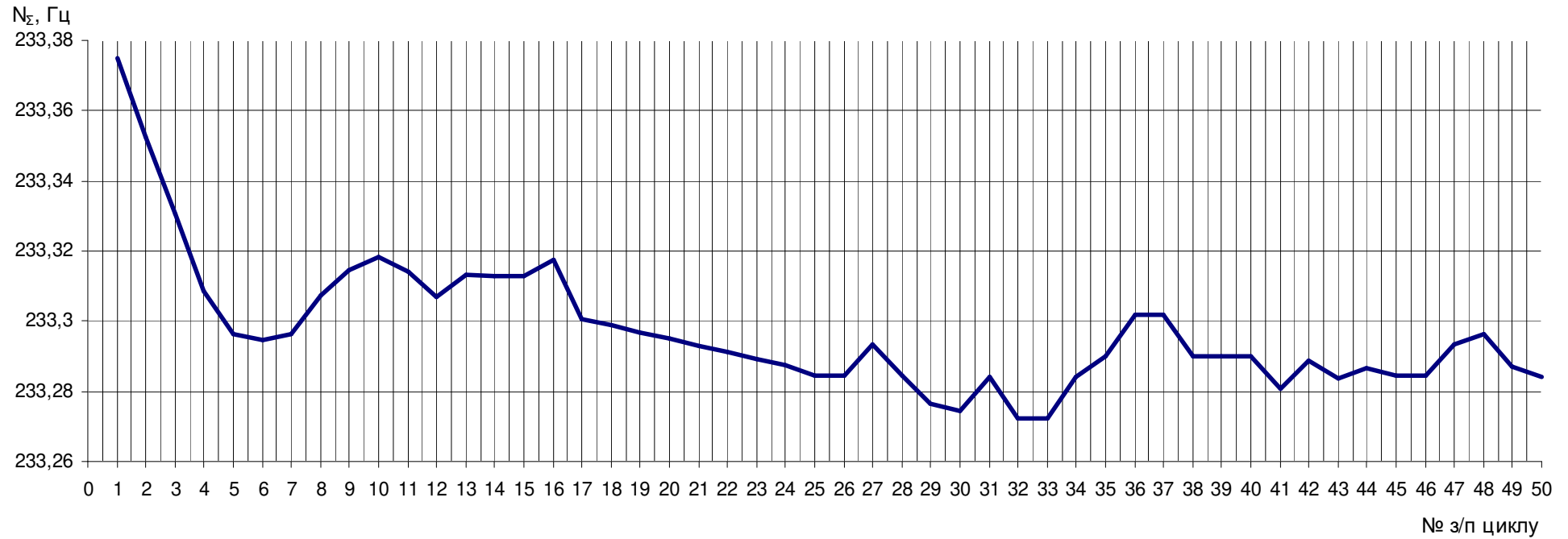


Рис. 6.3. Сумарне середнє значення періодів сигналу за 50 циклів при швидкості обертання поворотного пристрою з КЛ $\omega = 90^\circ/\text{с}$ з врахуванням зміни швидкості обертання Землі навколо своєї осі

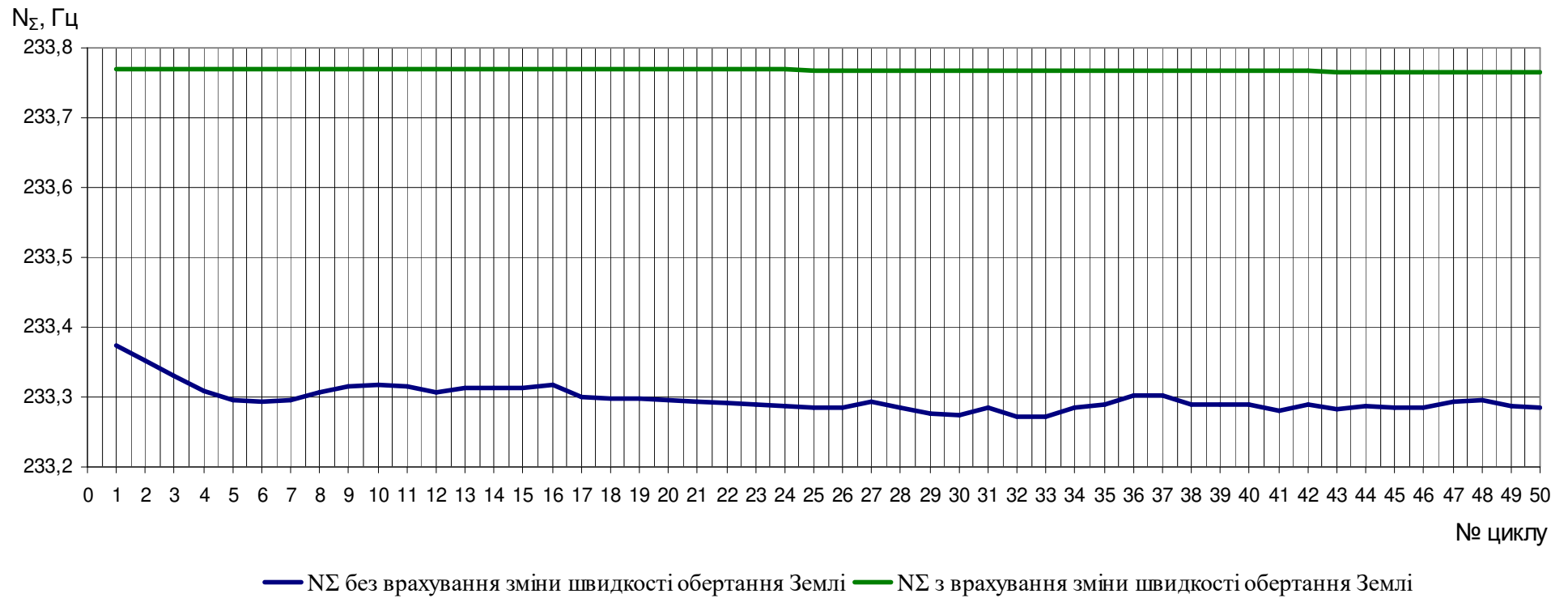


Рис. 6.4. Зведений графік значень сумарного середнє значення періодів сигналу за 50 циклів при швидкості обертання поворотного пристрою з КЛ $\omega = 90^\circ/\text{с}$ з / без врахування зміни швидкості обертання Землі навколо своєї осі

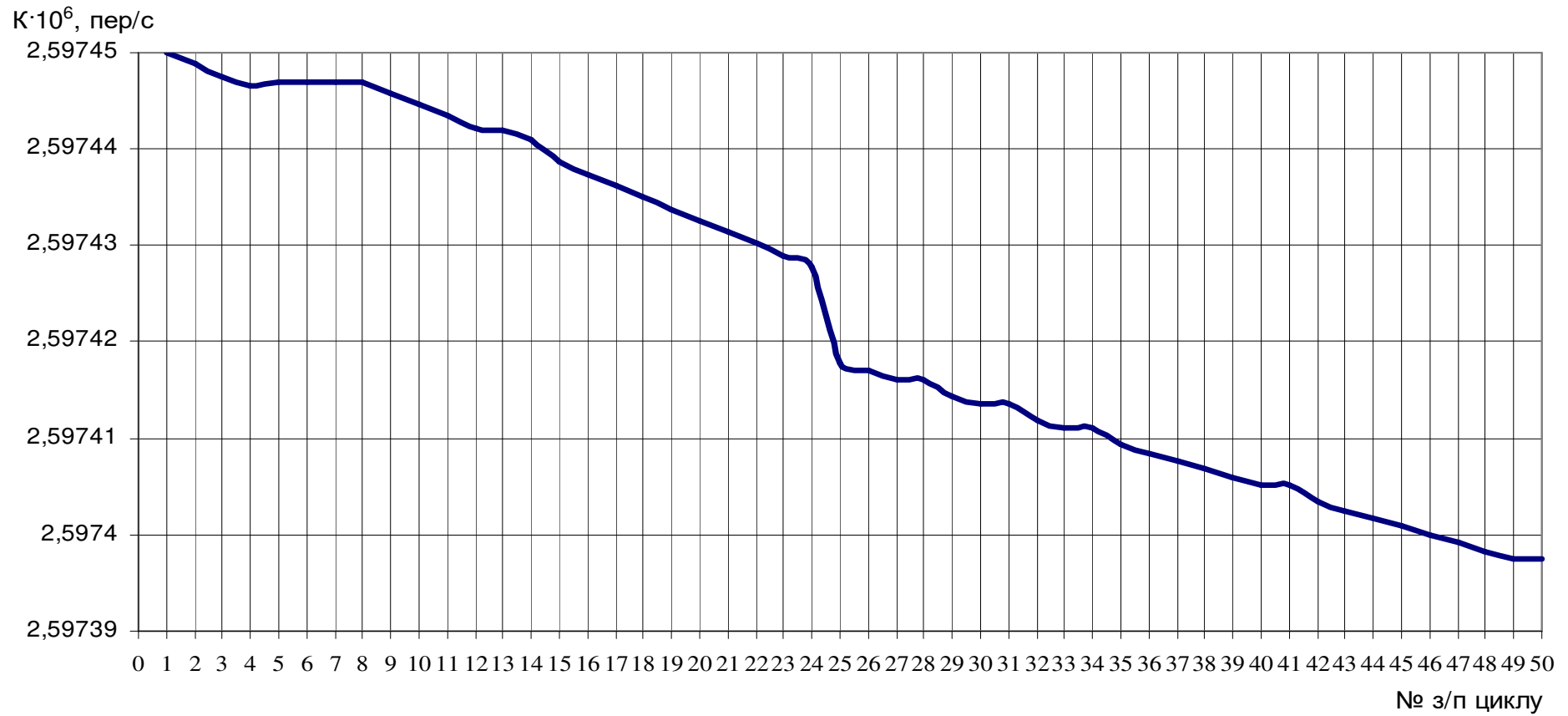


Рис. 6.5. Дрейф масштабного коефіцієнту за 50 циклів при швидкості обертання поворотного пристрою з КЛ $\omega = 90^\circ/\text{с}$ без врахування зміни швидкості обертання Землі навколо своєї осі

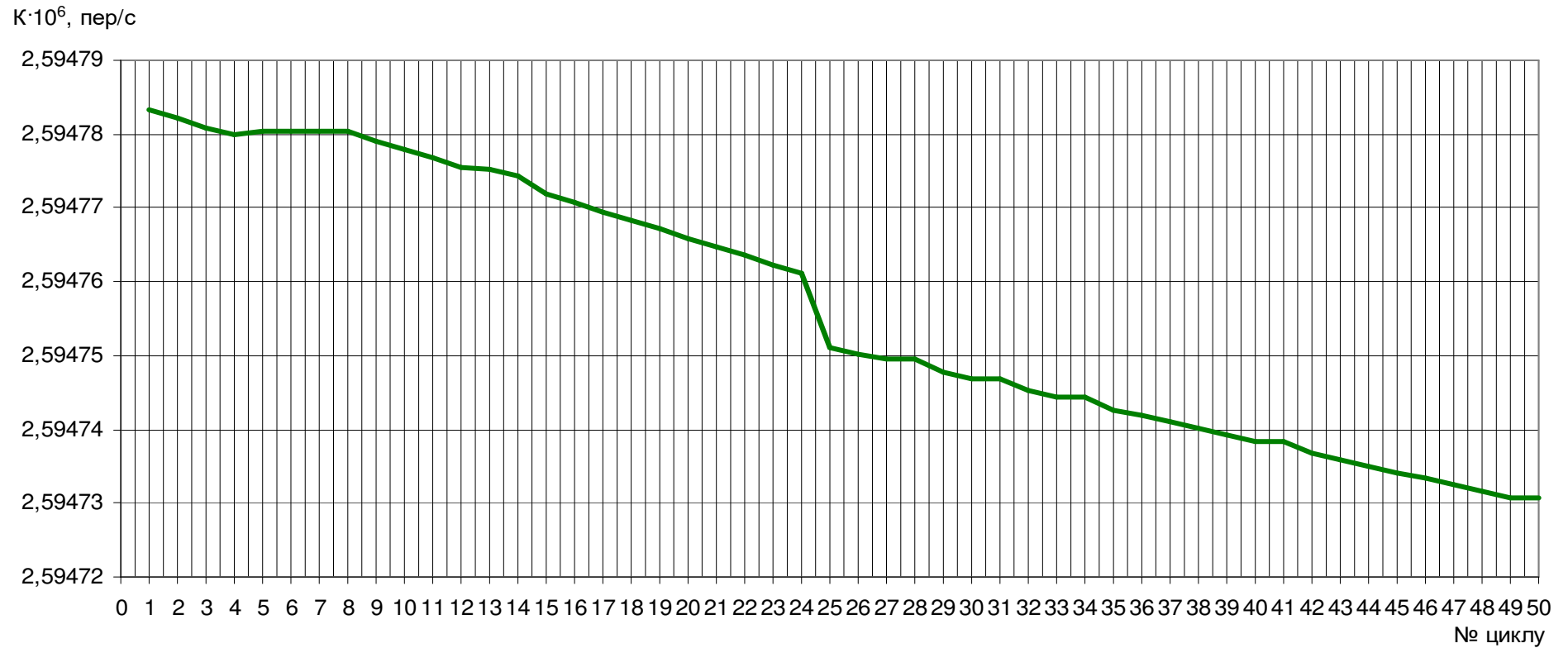


Рис. 6.6. Дрейф масштабного коефіцієнту за 50 циклів при швидкості обертання поворотного пристрою з КЛ $\omega = 90^\circ/\text{с}$ з врахуванням зміни швидкості обертання Землі навколо своєї осі

6.3. Дослідження дрейфу нуля вихідної характеристики кільцевого лазеру

При вимірюванні дрейфу нуля вихідної характеристики КЛ визначалась:

- постійна складова дрейфу ω_0 ;
- нестабільність дрейфу;

Постійна складова дрейфу ω_0 , визначалась за виразом (3.24), як усереднена величина. Постійна складова дрейфу ω_0 для 50 циклів вимірювання становить $\omega_0 \approx 0,3389795$ Гц. Графічне представлення результатів приведено на рис. 6.7.

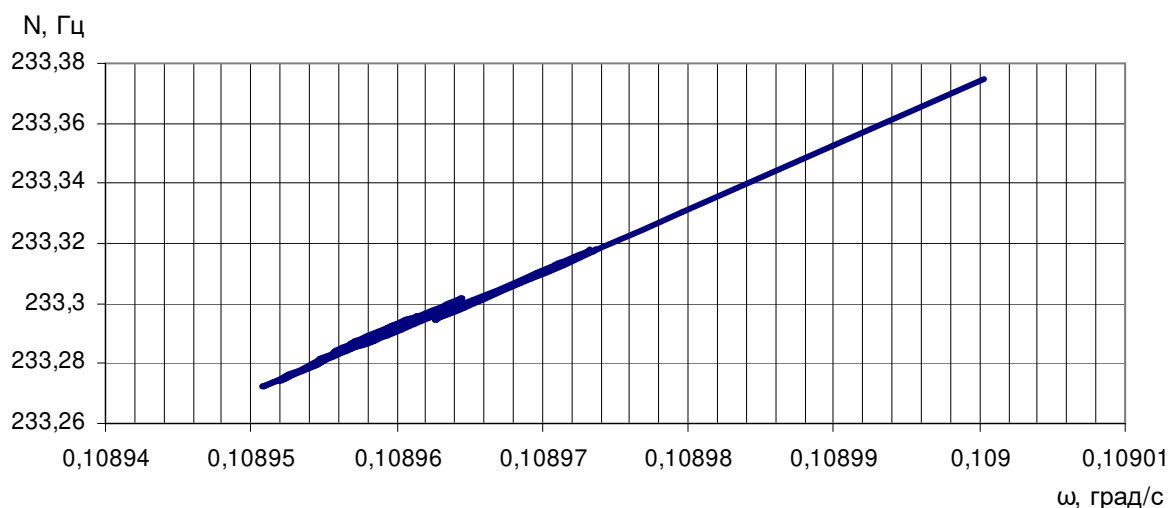


Рис. 6.7 Вихідна характеристика КЛ

Нестабільність дрейфу визначається як середнє квадратичне відхилення значень дрейфу $СВК\omega^+_0$ та $СВК\omega^-_0$, виміряних за 50 циклів протягом одного циклу при обертанні 5 разів “за” та 5 разів “проти” годинникової стрілки відповідно (рис. 6.10). За характером кривих зміни $СВК\omega^+_0$ та $СВК\omega^-_0$ за 50 циклів при обертанні “за” та “проти” годинникової стрілки відповідно видно, що після 25 циклу вони стають близькими за значеннями (табл. 6.3). Це свідчить про перебудову резонатора КЛ.

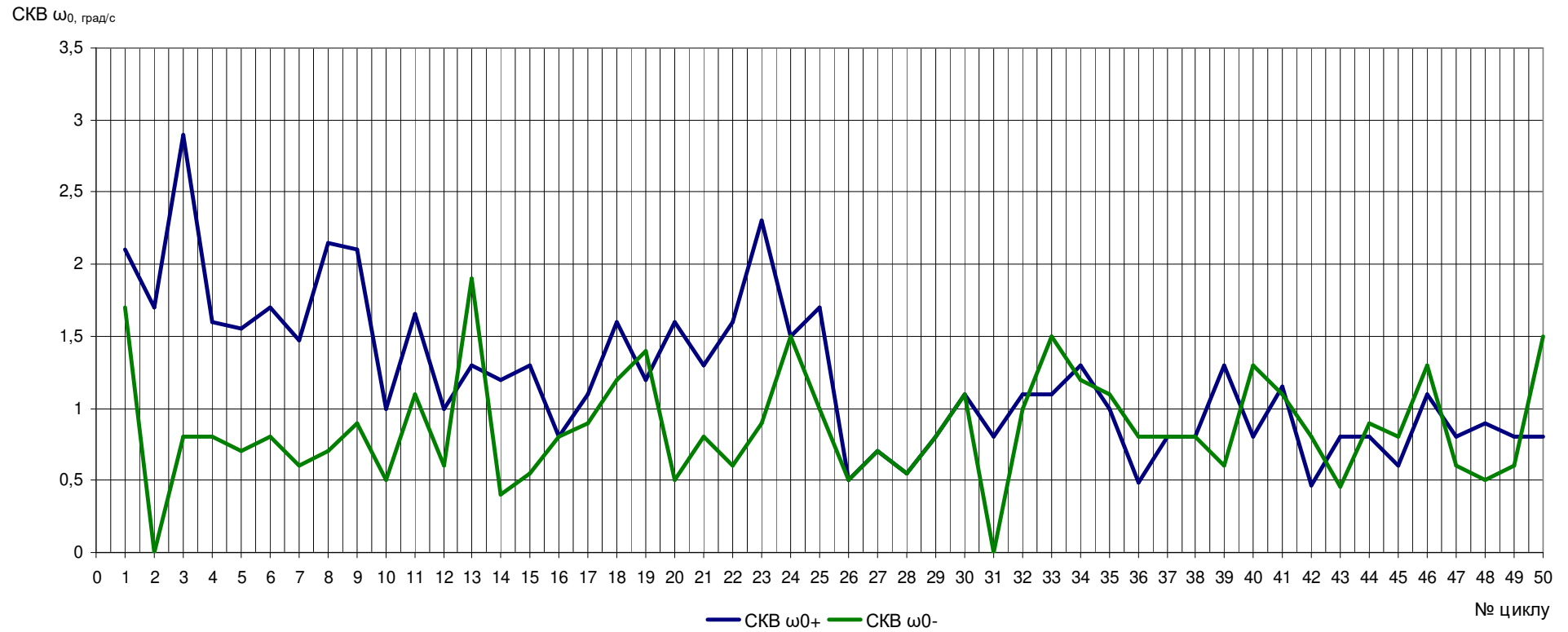


Рис. 6.8. Нестабільність дрейфу нуля вихідної характеристики КЛ

Таблиця 6.3

Нестабільність дрейфу як зміна $СВК\omega^+_0$ та $СВК\omega^-_0$ для 50 циклів при обертанні “за” та “проти” годинникової стрілки за 1 цикл

№ циклу	$СВК\omega^+_0$, град/с	$СВК\omega^-_0$, град/с	№ циклу	$СВК\omega^+_0$, град/с	$СВК\omega^-_0$, град/с
1	2,1	1,7	26	0,5	0,5
2	1,7	0	27	0,7	0,7
3	2,9	0,8	28	0,55	0,55
4	1,6	0,8	29	0,8	0,8
5	1,55	0,7	30	1,1	1,1
6	1,7	0,8	31	0,8	0
7	1,47	0,6	32	1,1	1
8	2,15	0,7	33	1,1	1,5
9	2,1	0,9	34	1,3	1,2
10	1	0,5	35	1	1,1
11	1,65	1,1	36	0,48	0,8
12	1	0,6	37	0,8	0,8
13	1,3	1,9	38	0,8	0,8
14	1,2	0,4	39	1,3	0,6
15	1,3	0,55	40	0,8	1,3
16	0,8	0,8	41	1,15	1,1
17	1,1	0,9	42	0,47	0,8
18	1,6	1,2	43	0,8	0,46
19	1,2	1,4	44	0,8	0,9
20	1,6	0,5	45	0,6	0,8
21	1,3	0,8	46	1,1	1,3
22	1,6	0,6	47	0,8	0,6
23	2,3	0,9	48	0,9	0,5
24	1,5	1,5	49	0,8	0,6
25	1,7	1	50	0,8	1,5

У досліджуваного КЛ, що пропонується до використання у складі пропонованої ППСВК в якості прецизійного перетворювача кута наявна система стабілізації периметра та система стабілізації потужності випромінювання, які дозволяють підтримувати точнісні параметри КЛ в допустимих межах і забезпечувати високу точність вимірювання до 0,1”.

6.4. Стабілізація параметрів кільцевого лазера

У вирішенні проблеми стабілізації параметрів (дрейфу нуля вихідної характеристики та дрейфу масштабного коефіцієнта) КЛ накопичений значний досвід [0, 2, 3, 4, 5, 7, 18, 18, 20, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29]. Традиційно для стабілізації параметрів КЛ, тому числі і пропонованого до використання у

ППСВК, здійснюється шляхом використання системи стабілізації периметра КЛ та системи стабілізації потужності випромінювання КЛ.

Система стабілізації периметра кільцевого лазера

Система стабілізації периметру КЛ призначена для підтримання постійною величину периметра L резонатора КЛ, яка змінюється при його функціонуванні. При функціонуванні КЛ в резонаторі в результаті теплових деформацій (при довготривалій роботі КЛ в режимі захоплення пучності стоячі хвилі деформують відбиваюче дзеркало, фрагментарно його випалюючи) відбуваються зміни відстаней між дзеркалами, що, призводить до зміни частоти вихідного сигналу КЛ.

Застосування системи стабілізації периметру КЛ (рис. 6.9), принципи роботи якої приводяться в літературі [29] дозволяє підтримувати величину периметра L резонатора постійною.

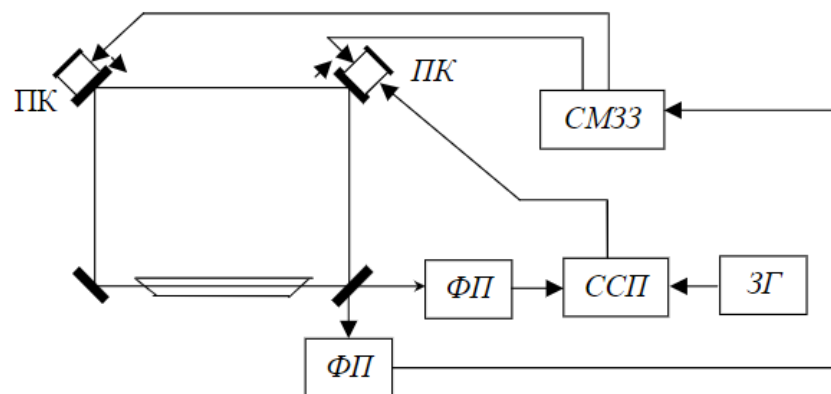


Рис. 6.9 [29]

При цьому при функціонуванні КЛ сторони резонатора можуть змінюватися довільним чином та відповідно призводити до зміни амплітуд і фаз коефіцієнтів зв'язку. Вказане є результатом недосконалості поверхонь відбиваючих елементів резонатора КЛ (наявності шорсткості малих значень). В наслідок шорсткості відбиваючих поверхонь резонатора відбувається розсіювання частини випромінювання в напрямку поширення зустрічної хвилі. Це призводить до появи між зустрічними хвилями зв'язку невеликого значення між. Тому одночасно зі стабілізацією периметра резонатора проводять регулювання довжин його сторін, спрямовану на мінімізацію сили зв'язку зустрічних хвиль і зони захоплення. Таке регулювання здійснюється за допомогою установки ще одного дзеркала на п'єзокерамічний перетворювач (див. рис. 6.9), що описано в літературі [29].

В якості сигналу помилки використовується глибина модуляція інтенсивності вихідного променя КЛ, обумовлена зв'язком зустрічних хвиль. Система мінімізації зони захоплення (СМЗЗ) подає постійні напруги різних знаків на два п'єзокерамічних перетворювача (ПК). При цьому дзеркала переміщуються в протилежних напрямках, зберігаючи периметр L незмінним, але варіюючи довжини сторін резонатора. В результаті змінюються відстані між розсіювальними центрами (дзеркалами) і як наслідок змінюються сумарні розсіяні хвилі. Одночасно з цим процесом система стабілізації периметра (ССП) здійснює стабілізацію частоти генерації.

Із літератури [29] відомо, що одним з параметрів, що істотно впливає на роботу ЛГ, є частота генерації КЛ, або розлад частоти генерації щодо центру лінії. Вихідна характеристика КЛ (масштабний коефіцієнт, зсув нуля, нелінійність) суттєво залежить від коефіцієнта посилення активного середовища і його дисперсії. Посилення і дисперсія є функціями розладу генерації щодо центру лінії. нормальне функціонування ЛГ неможливо без стабілізації частоти генерації. Оскільки частота генерації визначається довжиною резонатора і відповідної власної частотою резонатора (всередині лінії посилення) для підтримки стабільної частоти генерації необхідно компенсувати зміну L за допомогою керованого елемента (систему стабілізації частоти генерації часто називають системою регулювання периметра). Таким елементом зазвичай є п'єзокерамічний перетворювач, що змінює свою довжину при подачі на нього напруги. На нього кріпиться одне з дзеркал резонатора КЛ (рис. 6.10), яке, переміщуючись разом з перетворювачем, змінює L .

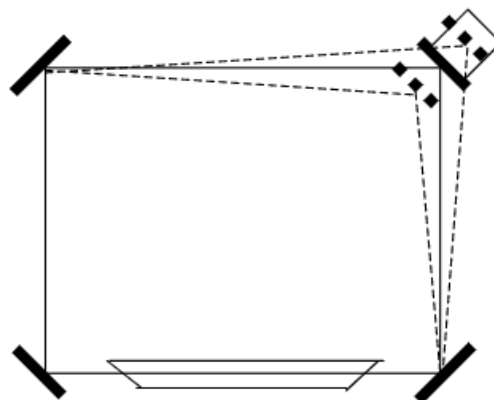


Рис. 6.10 [29]

Для стабілізації частоти генерації необхідно мати певний репер – опорну лінію, щодо якої можна було б визначати відходи частоти генерації. Найпростішим

репером, використовуваним для стабілізації периметра, є вершина залежності вихідної потужності від частоти генерації. На п'єзокерамічний перетворювач подається змінна напруга невеликої амплітуди, створює пошуковий сигнал. За рахунок пошукового сигналу вихідна потужність КЛ має змінну складову, фаза якої залежить від того, з якого боку від центру лінії знаходиться частота генерації, а амплітуда - наскільки далеко вона від центру лінії.

Принцип побудови системи стабілізації приведено в літературі [29], вона будується за схемою приведеною на рис. 6.11. Змінна складова інтенсивності одного з вихідних променів КЛ реєструється фотоприймачем ФП, посилюється в попередньому підсилювачі ПУ і подається на синхронний детектор (СД). В якості опорного сигналу на СД подається сигнал з звукового генератора ЗГ, використовуваного в якості джерела пошукового сигналу. СД виробляє сигнал постійного струму, знак якого визначається співвідношенням фаз вхідних сигналів, а значення – амплітудою змінної складової сигналу ФП. Фактично на виході СД ми маємо сигнал, що подається через підсилювач постійного струму ППС на п'єзокерамічний перетворювач ПК, що дорівнює нулю.

Система стабілізації периметра кільцевого лазера

Опис системи стабілізації потужності випромінювання КЛ приведено в літературі [30]. Система стабілізації потужності випромінювання побудована за принципом порівняння електричного сигналу, отриманого від фотоприймача, на який подається один з променів кільцевого лазера, з опорною напругою. При “розузгодженні” відповідним чином регулюється струм накачки кільцевого лазера.

Висновки до розділу 6

1. Проведено додаткові теоретичні і експериментальні дослідження та комп'ютерне моделювання параметрів кільцевого лазера, що показали добру збіжність та підтвердили можливість використання КЛ 3.970.029 у пропонованій ППСВК для забезпечення високої точності та швидкодії вимірювання кутів.

2. Дослідження проводились з та без врахування зміни швидкості обертання

Землі навколо своєї осі. Отримані результати підтверджують вплив швидкості обертання Землі на параметри КЛ. Для усунення похибки, що вносить нестабільність швидкості обертання Землі навколо своєї осі необхідно дотримуватись вимог встановлення осі обертання КЛ відносно осі обертання Землі.

3. Подальше підвищення точності вимірювання кутів за допомогою розглянутого КЛ може бути досягнуте перш за все за рахунок покращення параметрів підсистем кутовимірювального приладу, та застосування нових методів обробки інформації.

Література до розділу 6

1. Агапов М. Ю. Разработка и исследование гониометрических систем контроля преобразователей угла: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.11.16 “Информационно-измерительные и управляющие системы (приборостроение)” / Михаил Юрьевич Агапов. – Санкт-Петербург, 2009. – 17 с.

2. Баринава Е. А. Разработка и исследование методов повышения точности гониометрических систем: дис. канд. техн. наук: 05.11.16 “Информационно-измерительные и управляющие системы (приборостроение)” / Елена Анатольевна Баринава. – Санкт-Петербург, 2009. – 167 с.

3. Баринава Е. А. Метод и результаты исследования случайной погрешности оптического датчика угла / Е. А. Баринава, С. В. Гордеев, Е. М. Иващенко, П. А. Павлов // Метрология. – 2011. – №7. – С. 17–25.

4. Береза Б. В. Разработка и исследование лазерной гониометрической системы контроля средств измерений угловых параметров движения: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: 05.13.14 “Системы обработки информации и управления” / Борис Владиленович Береза. – Санкт-Петербург, 1993. – 20 с.

5. Бурнашев М. Н. Разработка прецизионных лазерных гониометрических систем / М. Н. Бурнашев, П. А. Павлов, Ю. В. Филатов // Квантовая электроника. – №2(43). – 2013. – С.130 – 138.

6. Гончаров Н. В. Разработка и исследование динамического гониометра на основе фотоэлектрического преобразователя угла: дис. канд. техн. наук: 05.11.16 “Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям)” / Никита Викторович Гончаров. – Санкт-Петербург, 2005. – 125 с.

7. Иващенко Е. М. Разработка методов исследования динамических гониометров для калибровки преобразователей угла: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.11.16 “Информационно-измерительные и управляющие системы (приборостроение)” / Иващенко Елена Михайловна – Санкт-Петербург – 2013. – 23 с.

8. Корнышева С. В. Измерение показателя преломления методом лазерной динамической гониометрии: автореф. дис. канд. техн. наук: 01.04.05 “Оптика” / Корнышева Светлана Владимировна – Москва, 2012. – 25 с.

9. Николаев М. С. Разработка и исследование методов измерения межгранных углов прозрачных призм на основе динамического гониометра: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.11.16 “Информационно-измерительные и управляющие системы (приборостроение)” / Николаев Максим Сергеевич – Санкт-Петербург. – 2012. – 25 с.

10. Павлов П. А. Разработка и исследование высокоточных лазерных гониометрических систем: дис. доктора техн. наук: 05.11.16 “Информационно-измерительные и управляющие системы (приборостроение)” / Петр Алексеевич Павлов – Санкт-Петербург, 2008. – 280 с.

11. Сушков А. С. Разработка средств и методов высокоточных интерференционных угловых измерений в геодезии : дис. канд. техн. наук : 05.24.01 “Геодезия” / Аркадий Сергеевич Сушков. – М., 1984. – 127 с.

12. Филатов Ю. В. Методы и средства лазерной гониометрии: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.11.07 “Оптические и оптико-электронные приборы” / Филатов Юрий Владимирович – Ленингр. ин-т точной механики и оптики. Л.: Изд-во ЛИТМО, 1991. – 32 с.

13. Bokhman E.D., Venediktov V.Yu., Korolev A.N., Lukin A.Ya., “Digital Goniometer With a Two-Dimensional Scale”, *J. Opt. Technol.*, **85**:5 (2018), 269–274

14. Belfi J., Beverini N., Di Virgilio A., Maccioni E., Astrua M., Pisani M., Santiano M., “Planar Angle Metrology: G-Las, the Inrim - Infn Ring Laser Goniometer”, *2016 European Frequency and Time Forum (Eftf)*, IEEE, 2016

15. Eno N.A., Pavlov P.A., Filatov V Yu., “Laser Goniometer Used For Remote Measurement of Angular Position and Movement For Metrology”, Proceedings of Spie, 10517, eds. Jalali B., Solli D., Steinmeyer G., Spie-Int Soc Optical Engineering, 2018, UNSP 105170P

16. Порцевський А. К. Выбор рациональной технологии добычи руд. Геомеханическая оценка состояния недр. Использование подземного пространства. Геоэкология. – М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2003. – 767 с.

17. Сидоренков Н. С. О синхронизации атмосферных процессов с частотами системы Земля – Луна – Солнце / Н. С. Сидоренков // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. – 2016. – №359. – С.33– 47.

18. Ави́ев А. А. Экспериментальное исследование оптико-электронного датчика параметров относительных крутильных колебаний кольцевого лазера / А. А. Ави́ев // Радиооптика. МГТУ им. Баумана. Электрон. Журн. – 2015. – №2 .– С.20 – 31 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/v/eksperimentalnoe-issledovanie-optiko-elektronnogo-datchika-parametrov-otnositelnyh-krutilnyh-kolebaniy-koltseвого-lazera>

19. Гнатейко Н. В. Влияние скорости вращения земли на точность измерения углов с помощью лазерного гироскопа / Н. В. Гнатейко, Е. Н. Безвесильная, Н. И. Штефан, В. В. Гнатейко // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія Приладобудування. – 2010. – Вип. 39. – С. 29 – 33.

20. Азарова В. В. Кольцевые газовые лазеры с магнитооптическим управлением в лазерной гироскопии / В. В. Азарова, Ю. Д. Голяев, В. Г. Дмитриев // Квантовая электроника. – 2000. – №2(30). – С. 96-104.

21. Киричук Ю. В. Автоматизована приладова інформаційно-вимірювальна система: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.11.01 “Прилади та методи вимірювання механічних величин” / Киричук Юрій Володимирович – Одеса – 2016. – 43 с.

22. Лепешкин Д. В. Методы оптимизации и уменьшения ошибок лазерного гироскопа: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.11.07 “Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы” / Лепешкин Дмитрий Викторович – Москва – 2007. – 25 с.

23. Колбас Ю. Ю. Гирокомпас на основе Зеемановского кольцевого лазера: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.11.07 “Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы” / Колбас Юрий Юрьевич – Москва – 2011. – 25 с.

24. Мишин В. Ю. Методы обработки информации в лазерном гироскопе с прецизионной регистрацией перемещений интерференционной картины: автореф. дис. канд. техн. наук: 01.04.01 “Приборы и методы экспериментальной физики” / Мишин Валерий Юрьевич – Рязань – 2013. – 23 с.

25. Ильин С. А. Разработка и исследование методов уменьшения влияния зоны синхронизации на работу лазерного гироскопа: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.13.01 “Системный анализ, управление и обработка информации” / Ильин Сергей Анатольевич – Москва. – 2001. – 25 с.

26. Суханов С. В. Методы и алгоритмы повышения точностных характеристик лазерного гироскопа: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.13.01 “Системный анализ, управление и обработка информации” / Суханов Сергей Валерьевич – Нижний Новгород. – 2009. – 23 с.

27. Бойко Д. Л. Автомодуляционные колебания излучения монолитного твердотельного кольцевого лазера: автореф. дис. канд. физ.-мат. наук: 05.27.03 “Квантовая электроника” / Бойко Дмитрий Леонидович. – Москва. – 1998. – 25 с.

28. Молчанов А. В. Исследование конструктивно-технологических характеристик лазерного гироскопа с целью повышения его качества: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.11.14 “Технология приборостроения” / Молчанов Алексей Владимирович. – Москва. – 2005. – 23 с.

29. Филатов Ю. В. Оптические гироскопы / Ю. В. Филатов. Санкт-Петербург – 2005. – 139 с.

30. Безвесільна О. М. Автоматизований прецизійний пристрій для вимірювання кутів: Монографія. / О. М. Безвесільна. – Житомир: ЖДТУ, 2010. – 258 с.

ВИСНОВКИ ТА ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

У дисертаційній роботі вирішена важлива наукова проблема підвищення точності та швидкодії гоніометричних вимірювань шляхом розробки прецизійної приладової системи вимірювання кутів за рахунок використання фізичних явищ лазерної спектроскопії, фізичних принципів роботи напівпровідникових фоточутливих елементів, нейромережових технологій, теорії ймовірності та математичної статистики, методів системного підходу, теорії множин, дискретної та обчислювальної математики, а також комп'ютерного моделювання.

Основні наукові та практичні *результати* роботи наступні:

1. Як результат теоретично узагальнених підходів до підвищення точності та швидкодії вимірювання кутів, виокремлено нові методи та засоби, синергетична інтеграція яких в складі пропонованої ППСВК дозволила підвищити точність на 0,2" (3 рази) та швидкість вимірювання до масштабів реального часу, а також розширити функціональні можливості ППСВК порівняно із відомими.

2. Обґрунтовано сукупність принципів побудови пропонованої ППСВК, комплексне дотримання яких дозволило отримати якісно нову вимірювальну систему підвищеної точності та швидкодії порівняно із відомими.

3. Розроблено новітню математичну модель похибки в частині врахування похибки фоточутливої КМОП-матриці шляхом виокремлення флуктуаційних напруг, які виникають через дробовий та тепловий ефекти, а також нестабільності швидкості обертання Землі, що в результаті дало можливість їх комплексного врахування при визначенні похибок та підвищити точність вимірювання пропонованої ППСВ на 0,2" (3 рази) порівняно відомими науковими результатами.

4. Запропоновано підхід та методику визначення необхідної кількості спостережень при багаторазових вимірюваннях, яка достатня для досягнення заданої точності та використовується при нормуванні випадкових складових похибок вимірювання кутів. Експериментально доведено, що запропонована методика дозволила обґрунтувати кількість спостережень при багаторазових вимірюваннях, в результаті чого було підвищено швидкість у 1,3 рази порівняно із відомими науковими результатами при вимірюванні кутів з позитивним

декрементом точності.

5. Розроблено ШНМ та проведено їх експериментальні дослідження шляхом комп'ютерного моделювання, що підтверджують працездатність пропонованих ШНМ та вказують на ефективність їх застосування у складі пропонованої ППСВК на ниві недостатньої автоматизації визначення складових похибок вимірювання за принципом їх декомпозиції із застосуванням дисперсійного критерію Фішера.

6. На підставі розвитку методу ковзного середнього здійснено придавлення завад та підвищено якість вихідного сигналу для підвищення точності вимірювання кутів пропонованою ППСВК.

7. Розроблене алгоритмічне та програмне забезпечення з використанням нейроімітатора, середовища математичного моделювання та мови програмування MATLAB дало можливість автоматизувати функціонування пропонованої ППСВК, пришвидшити процес вимірювання та обробки інформації, а також забезпечити підвищення швидкодії та точності отриманих кінцевих результатів.

8. Практичні та теоретичні результати роботи впроваджено на ПАТ “НВО “Київський завод автоматики” при підвищенні точності та швидкодії кутових вимірювань та у навчальний процес Житомирського державного технологічного університету при підготовці фахівців за спеціальністю “Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології”.

ДОДАТКИ

Додаток А

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

ДЕРЖАВНИЙ КОНЦЕРН «УКРОБОРОНПРОМ»
The State Concern UKROBORONPROM

ПУБЛІЧНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
“НАУКОВО-ВИРОБНИЧЕ
ОБ’ЄДНАННЯ
“КИЇВСЬКИЙ ЗАВОД АВТОМАТИКИ”



PUBLIC JOINT STOCK COMPANY
“RESEARCH-AND-PRODUCTION
ASSOCIATION
“KYIV AUTOMATICS PLANT”

вул. Старокіївська, 10, м. Київ, 04116 Україна
Тел./факс: +38044-236-62-75
http: <http://www.kza.com.ua> E-mail: kza@kza.com.ua

10 Starokyivska str., Kyiv, 04116, Ukraine
Tel/fax: +38044-236-62-75
http: <http://www.kza.com.ua> E-mail: kza@kza.com.ua

вих. № _____

на № _____ від _____

АКТ

впровадження основних положень дисертаційної роботи

Черепанської Ірини Юріївни

Цим підтверджується, що результати наукових досліджень, які опубліковані у наукових статтях та узагальнені у дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук Черепанської Ірини Юріївни “Прецизійна приладова система вимірювання кутів” використані при дослідженні шляхів підвищення точності та швидкодії кутових вимірювань, а також впроваджені у дослідження по тематиці ПАТ “НВО “Київський завод автоматики” при участі автора.

Акт не є підставою до взаємних фінансових розрахунків.

Перший заступник

Голови Правління

Головний інженер



В.Г. Цірук



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЖИТОМИРСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Ministry of Education and Science of Ukraine, Zhytomyr State Technological University

вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, 10005
 Chudnivska str., 103, Zhytomyr, 10005, Ukraine
 Tel./fax: (0412) 24-14-22, 24-14-23, e-mail: rector@ztu.edu.ua, https://ztu.edu.ua, код ЄДРПОУ 05407870

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ВІДПОВІДАЄ ДСТУ ISO 9001:2015
QUALITY MANAGEMENT SYSTEM ISO 9001:2015

Від 19 листопада 2018 № 44-22.06/1777
 На № _____ від _____

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи Черепанської І.Ю. на тему
 “Прецизійна приладова система вимірювання кутів”

Житомирський державний технологічний університет підтверджує, що наукові та практичні результати дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук Черепанської Ірини Юріївни використовуються в навчальному процесі при підготовці фахівців на факультеті комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки та робототехніки за спеціальністю 151 “Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології”.

Використання результатів досліджень полягає у безпосередньому їх включенні до навчального процесу, при викладанні на кафедрі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ім. проф. Б.Б. Самотокаїна дисциплін “Основи метрології”, “Технологічні вимірювання та прилади”, “Технології штучного інтелекту”, “Планування, моделювання та верифікація процесів у ГВС” у вигляді лекційного матеріалу, лабораторних робіт та курсового проектування.

В цьому сенсі, за активною участю Черепанської І.Ю. видано 3 монографії “Теорія та принципи побудови автоматизованої системи для лінійних та кутових переміщень об'єктів виробництва з використанням математичного апарату кватерніонів та штучних нейронних мереж” (автори Черепанська І.Ю., Кирилович В. А., Безвесільна О. М., Сазонов А. Ю., 2016 р.), “Штучні нейронні мережі при вирішенні задач у технологічних вимірюваннях, приладобудуванні та проектуванні гнучких виробничих систем” (автори Черепанська І.Ю., Безвесільна О. М., Сазонов А. Ю., Хильченко Т. В., 2017 р.), “Штучні нейронні мережі при вирішенні задач технологічної підготовки гнучкого виробництва” (автори Черепанська І.Ю., Безвесільна О. М., Сазонов А. Ю. 2018 р.), 2 навчально-методичні посібники “Планування, моделювання та верифікація процесів у гнучких виробничих системах. Практикум” (автори

Черепанська І.Ю., Кирилович В.А., Сазонов А.Ю., Самотокін Б.Б., 2015 р.), “Метрологія та вимірювальна техніка” (автори Коваленко І.О., Черепанська І.Ю., 2008 р.) для студентів спеціальності “Автоматизоване управління технологічними процесами”, а також 1 міжнародний навчально-методичний посібник до виконання практичних, лабораторних та самостійних занять студентів, в рамках міжнародного проекту TEMPUS “EU-PC Double Degree Master Program in Automation Mechatronics”, 5171138-TEMPUS-1-2011-CZ- TEMPUS-JPCR, координатор якого Житомирський державний технологічний університет – “Планирование, моделирование и верификация процессов в гибких производственных системах” (авторы Черепанская И.Ю., Кирилович В.А., Сазонов А.Ю., Самотокин Б.Б., 2014 г.), в яких знайшли відображення результати досліджень дисертаційної роботи.

Перший проректор ЖДТУ,
доктор економічних наук, професор,
академік Академії Економічних Наук України



О.В. Олійник

Додаток Б

Матеріали патентів на корисну модель



МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **127373** (13) **U**
(51) МПК
G01B 21/22 (2006.01)

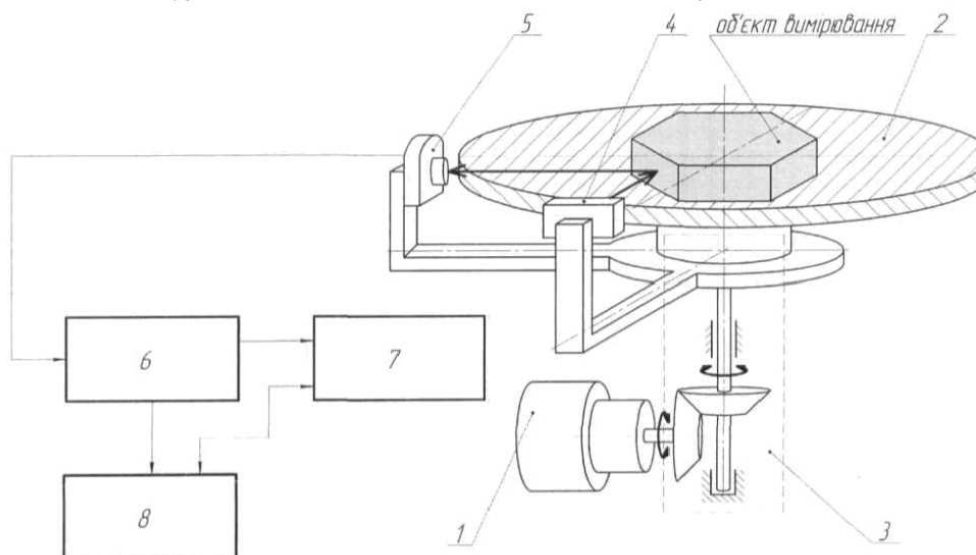
(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2018 02424	(72) Винахідник(и): Черепанська Ірина Юрївна (UA), Безвесільна Олена Миколаївна (UA), Сазонов Артем Юрійович (UA)
(22) Дата подання заявки: 12.03.2018	(73) Власник(и): ЖИТОМИРСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, 10005 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 25.07.2018	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 25.07.2018, Бюл.№ 14	

(54) ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ

(57) Реферат:

Інтелектуальна система вимірювання кутів містить привод обертання, який механічно з'єднаний з предметним столом, що встановлений на обертовому пристрої, на якому жорстко закріплені кільцевий лазер і автоколіматор, який підключений до входу блока керування, ЕОМ. Додатково введено модуль штучної нейронної мережі (ШНМ), який спряжений з ЕОМ, вхід якої з'єднаний із виходом блока керування, інший вихід якого з'єднаний з входом модуля ШНМ.



UA 127373 U

UA 127373 U

Корисна модель належить до вимірювальної техніки і може бути використана для кутових вимірювань у гнучких виробництвах машино- та приладобудування.

Відома система високоточного вимірювання кута [1], що є найбільш близькою за суттєвими ознаками до запропонованої корисної моделі, що пропонується, і вибрана як найближчий аналог.

Найближчий аналог, як і корисна модель, що пропонується, містить привод обертання, який механічно з'єднаний з предметним столом, що встановлений на обертовому пристрої, на якому жорстко закріплені кільцевий лазер і автоколіматор, який підключений до входу блока керування, ЕОМ.

Але на відміну від корисної моделі, що пропонується, в найближчому аналозі наявна відеокамера. Відеокамера використовується для безпосереднього документування вимірювань, з наступним багатоетапним перетворенням візуальної інформації у цифрову форму для її обробки. При цьому наявність відеокамери призводить до зашумленості вихідного сигналу і, як наслідок, значних інструментальних похибок. Крім того, в найближчому аналозі обробку вимірювальних даних виконують тільки послідовно, без можливості попереднього автоматизованого визначення складових похибки вимірювання - систематичних та випадкових, для яких застосовуються принципово різні методи обчислення. Тому час, що витрачається на обробку вимірювальних даних в найближчому аналозі, значно тривалий.

Таким чином, суттєвим недоліком найближчого аналога є низькі точність та продуктивність вимірювання кутів.

В основу корисної моделі поставлена задача удосконалення системи високоточного вимірювання кута шляхом введення модуля штучної нейронної мережі (ШНМ), який спряжений з ЕОМ, вхід якої з'єднаний з виходом блока керування, інший вихід якого з'єднаний з входом модуля ШНМ, щоб забезпечити технічний результат - підвищення точності та продуктивності вимірювання кутів.

Поставлена задача вирішується тим, що додатково до складу системи введений модуль ШНМ попередньо навчений виявляти та розпізнавати випадкову та систематичну складові похибки вимірювання. Результати роботи модуля ШНМ аналізуються в ЕОМ та робляться висновки щодо складу похибки вимірювання. Як відомо [2, 3], методи розрахунку, нормування та компенсації випадкової та систематичної складових похибки вимірювання є принципово різними. Тому правильне визначення складових похибок вимірювання сприяє коректному застосуванню відповідних методів обробки вимірювальних даних, дозволяє уникати хибностей та неточностей і суттєво підвищити точність вимірювання в цілому.

При цьому модуль ШНМ дозволяє здійснювати одночасну обробку множини вимірювальних даних методами паралельної обробки інформації. Тому час, що витрачається на обробку вимірювальних даних, суттєво скорочується.

Таким чином, досягається поставлена задача - підвищення точності та продуктивності вимірювання кутів.

Суть корисної моделі пояснюється кресленням, на якому представлена структурна схема корисної моделі. Інтелектуальна система вимірювання кутів містить привод 1 обертання, предметний стіл 2, обертовий пристрій 3, кільцевий лазер 4, автоколіматор 5, блок 6 керування, модуль 7 ШНМ, ЕОМ 8.

Привод 1 обертання, механічно з'єднаний з предметним столом 2, що встановлений на обертовому пристрої 3. На ньому жорстко закріплені кільцевий лазер 4 і автоколіматор 5, який підключений до блока 6 керування. Модуль 7 ШНМ спряжений з ЕОМ 8, вхід якої з'єднаний з виходом блока 6 керування. Інший вихід блока 6 керування з'єднаний із входом модуля 7 ШНМ.

Інтелектуальна система вимірювання кутів працює таким чином.

Об'єкт вимірювання, наприклад, призма, кути якої підлягають вимірюванню, розміщується на предметному столі 2. Предметний стіл 2 встановлено на обертовий пристрій 3, який обертається з постійною швидкістю за допомогою приводу 1 обертання. При обертанні обертового пристрою 3 з об'єктом вимірювання призмою від кожної її грані на виході автоколіматора 5 отримують аналогові сигнали у вигляді електричних імпульсів. Ці імпульси надходять у блок 6 керування, в якому відцифровуються і передаються на вхід модуля 7 ШНМ. Він може бути реалізований, наприклад, нейропроцесором або, наприклад, нейроімітатором, який за алгоритмом роботи модуля 7 ШНМ обробляє цифрові сигнали. В результаті роботи модуля 7 ШНМ в ньому формується цифровий сигнал про склад похибки вимірювання у вигляді вектора Y цифрових сигналах: $Y = \{y_m | m = \overline{1;2}\}$. Максимальне значення y_1 відповідає наявності у результатах вимірювання систематичної складової похибки вимірювання, а максимальне значення y_2 - випадковій складовій похибки вимірювання. Цей сигнал передається на ЕОМ 8. В

UA 127373 U

ній здійснюється автоматизована обробка вимірювальної інформації, зокрема нормування складових похибок вимірювання за відомими методами з представленням результатів у зручній для користувача формі.

Джерела інформації:

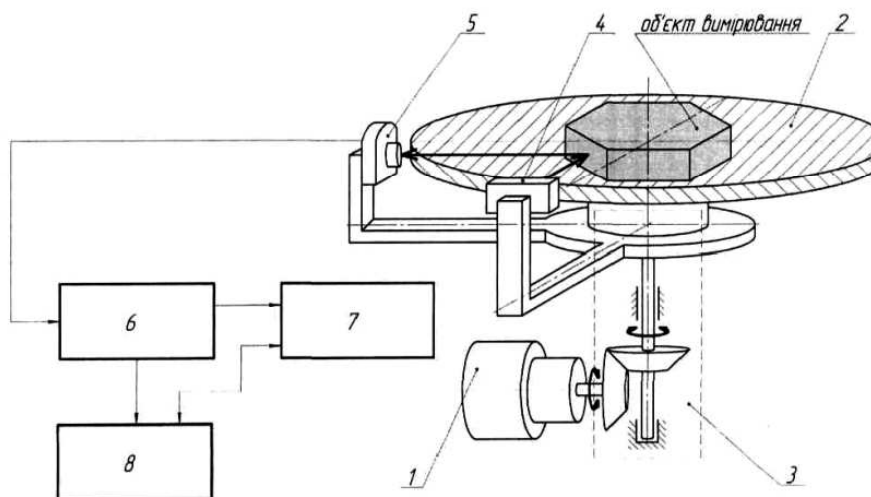
5 1. Патент на корисну модель 44131; МПК: G01B 11/26. Система високоточного вимірювання кута з відеозйомкою/ Безвесільна О.М., Ткаченко С.С.; заявник і власник - Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". - 200901845; заявл. 02.03.2009; надр. 25.09.2009, Бюл. № 18.

10 2. ДСТУ ГОСТ 8.009:2008 Державна система забезпечення єдності вимірювань. Нормовані метрологічні характеристики засобів вимірювань.

3. ДСТУ-Н РМГ 63:2013 Государственная система обеспечения единства измерений. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Метрологическая экспертиза технической документации (РМГ 63-2003, IDT).

15 ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Інтелектуальна система вимірювання кутів, що містить привод (1) обертання, який механічно з'єднаний з предметним столом (2), що встановлений на обертовому пристрої (3), на якому жорстко закріплені кільцевий лазер (4) і автоколіматор (5), який підключений до входу блока (6) керування, ЕОМ (8), який відрізняється тим, що введено модуль (7) штучної нейронної мережі (ШНМ), який спряжений з ЕОМ (8), вхід якої з'єднаний із виходом блока (6) керування, інший вихід якого з'єднаний з входом модуля (7) ШНМ.



Комп'ютерна верстка А. Крулевський

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601



МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **124155** (13) **U**

(51) МПК

G01B 21/22 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2017 09792	(72) Винахідник(и): Черепанська Ірина Юріївна (UA), Безвесільна Олена Миколаївна (UA), Сазонов Артем Юрійович (UA)
(22) Дата подання заявки: 09.10.2017	(73) Власник(и): ЖИТОМИРСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, 10005 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 26.03.2018	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 26.03.2018, Бюл.№ 6	

(54) СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ

(57) Реферат:

Спосіб вимірювання кутів, в якому об'єкт вимірювання, наприклад призму, встановлюють на предметному столі гоніометра і виконують багаторазові вимірювання кутів, повертаючи її на 180° навколо осі, яка проходить через нормаль до однієї з її граней. Вимірювальну інформацію в цифровій формі подають на вхід штучної нейронної мережі, що виконує операцію розпізнавання образів і яка попередньо навчена за способом "навчання з вчителем" розпізнавати систематичні та випадкові складові похибок вимірювання, зміна яких в часі являє собою нестационарний випадковий процес, і яка реалізована, наприклад, у вигляді перепрограмованого нейропроцесора з налагоджуваною структурою нейронів по одній із відомих моделей.

UA 124155 U

UA 124155 U

Корисна модель належить до вимірювальної техніки і може бути використана для кутових вимірювань у гнучких виробництвах машино- та приладобудування.

Відомий спосіб вимірювання кутів [1], що прийнятий за прототип. Він полягає в тому, що об'єкт вимірювання, наприклад призму, встановлюють на предметному столі гоніометра і виконують багаторазові вимірювання кутів, повертаючи її на 180° навколо осі, яка проходить через нормаль до однієї з її граней. Потім знаходять середнє значення виміряних кутів. Також додатково визначають різницю кутів, виміряних у початковому та перевернутому положеннях об'єкта вимірювання і порівнюють отриману різницю з припустимою похибкою вимірювання. При вимірюванні кутів задають припустиме значення похибки вимірювання, багаторазово кільцевим лазером сканують поверхню об'єкта вимірювання, отримуючи оцифровану множину значень кутів, запам'ятовують їх та послідовно оброблюють, визначаючи складову похибки вимірювання та її величину.

Суттєвими недоліками способу-прототипу є низькі точність та продуктивність. Низька точність зумовлюється великими інструментальними похибками, а багатократна обробка вимірювальної інформації для визначення вимірюваного кута та похибки вимірювання займає тривалий час. При цьому обробка отриманих вимірювальних даних може виконуватись тільки з їх послідовною обробкою, тому час, що витрачається, буде більш тривалим.

Суть корисної моделі полягає в тому, що у способі вимірювання кутів, в якому об'єкт вимірювання, наприклад призму, встановлюють на предметному столі гоніометра і виконують багаторазові вимірювання кутів, повертаючи її на 180° навколо осі, яка проходить через нормаль до однієї з її граней, введені нові суттєві ознаки. Вимірювальну інформацію в цифровій формі подають на вхід штучної нейронної мережі, що виконує операцію розпізнавання образів і яка попередньо навчена за способом "навчання з вчителем" розпізнавати систематичні та випадкові складові похибок вимірювання, зміна яких в часі являє собою нестационарний випадковий процес, і яка реалізована, наприклад, у вигляді перепрограмованого нейропроцесора з налагоджуваною структурою нейронів по одній із відомих моделей.

Технічний результат - підвищення продуктивності та точності способу вимірювання кутів.

Більша продуктивність заявленого способу визначається тим, що для обробки оцифрованої вимірювальної інформації використовується метод паралельної обробки інформації, що реалізується штучною нейронною мережею (ШНМ). При цьому швидкодія обробки досягається за рахунок того, що інформація, яка подається на ШНМ, обробляється нею вся одночасно (креслення), а не послідовно. При цьому час обробки інформації залежить як від технічних характеристик ШНМ (від тактової частоти, розрядності, кількості нейронів прихованого шару тощо), так і від розмірності вимірювальної інформації, що визначається необхідною кількістю вимірювань.

Більша точність запропонованого способу обумовлюється тим, що ШНМ виявляє та розпізнає випадкову та систематичну складові похибки вимірювання. А це, в свою чергу, обумовлює вірний вибір та застосування відповідних відомих методів їх нормування та компенсації, які є принципово різними. Зокрема систематичні складові похибки можуть бути практично повністю усунені введенням відповідних поправок, а випадкові - можна суттєво зменшити шляхом збільшення кількості спостережень.

На кресленні представлено принцип подачі оцифрованої вимірювальної інформації на вхід ШНМ для її обробки.

ШНМ, що використовується в заявленому способі, за типом реалізації нейроалгоритмів, характером реалізації нелінійних перетворювань та можливістю побудови, реалізується перепрограмованим нейропроцесором з налагоджуваною структурою нейронів по одній із відомих моделей (багатошаровий перцептрон, мережа Хопфілда тощо). Навчання ШНМ здійснюється за методом "навчання з вчителем" за алгоритмом "back propagation" - зворотного розповсюдження помилки.

Джерела інформації:

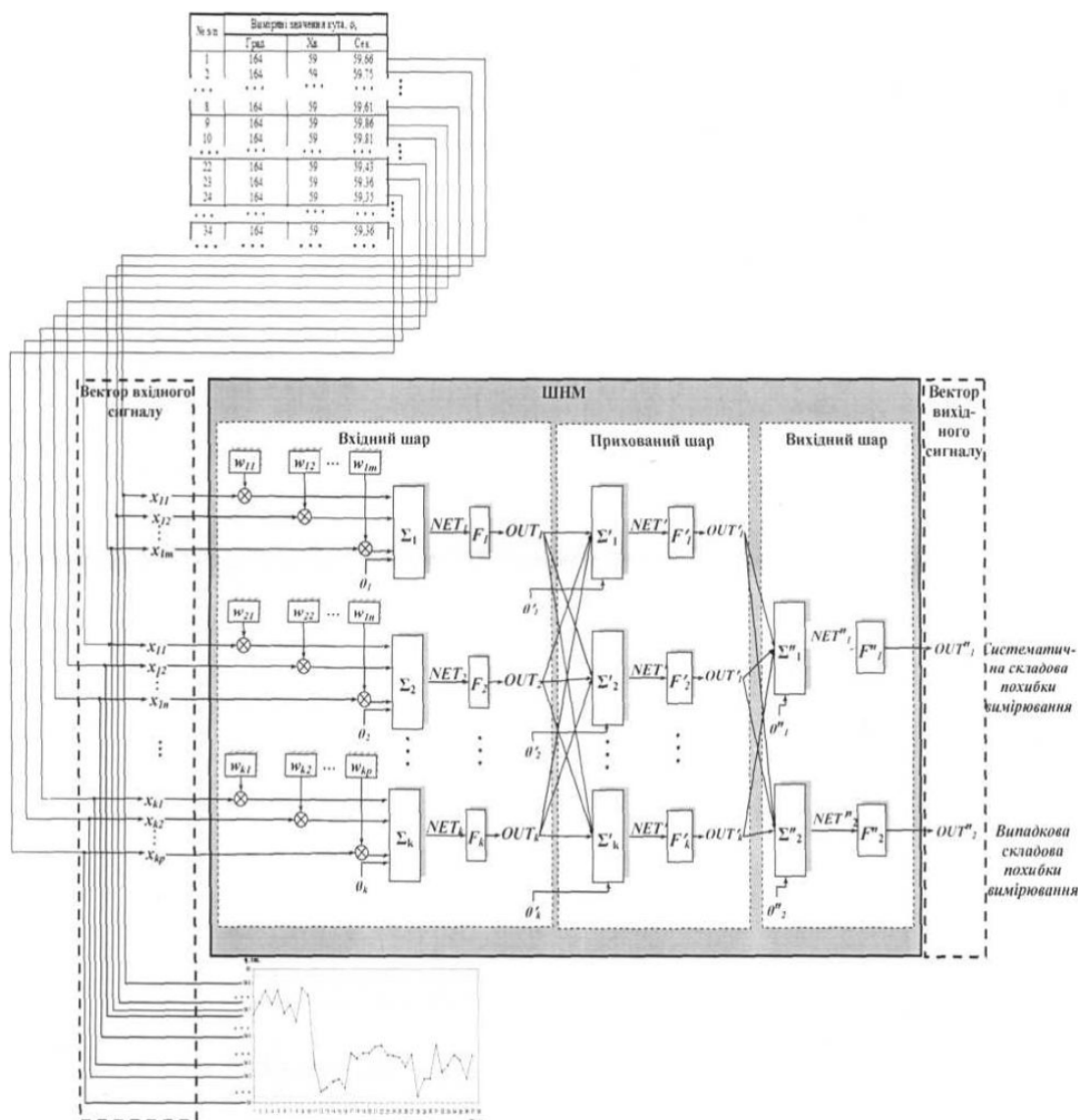
1. Деклар. пат. 53171 А; МПК: G01B 11/26, G01B 9/10. Спосіб вимірювання кутів за допомогою гоніометра / Безвесільна О.М., Зайцев Ю.І., Старцев С.М., Янчук О.М.; заявник і патентотримувач Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут".-2002032422; заявл. 27.03.2002; надр. 15.01.2003, Бюл. № 1.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Спосіб вимірювання кутів, в якому об'єкт вимірювання, наприклад призму, встановлюють на предметному столі гоніометра і виконують багаторазові вимірювання кутів, повертаючи її на 180° навколо осі, яка проходить через нормаль до однієї з її граней, який **відрізняється** тим,

UA 124155 U

- що вимірювальну інформацію в цифровій формі подають на вхід штучної нейронної мережі, що виконує операцію розпізнавання образів і яка попередньо навчена за способом "навчання з вчителем" розпізнавати систематичні та випадкові складові похибок вимірювання, зміна яких в часі являє собою нестационарний випадковий процес, і яка реалізована, наприклад, у вигляді
- 5 перепрограмованого нейропроцесора з налагоджуваною структурою нейронів по одній із відомих моделей.



Комп'ютерна верстка О. Рябко

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

Додаток В

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

За результатами досліджень опубліковано 37 наукових праць, у тому числі 4 монографії, 18 статей у наукових фахових виданнях (з них 8 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 2 патенти на корисну модель, 13 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Монографії:

1. Сазонов А. Ю. Наукові основи автоматизованого керування точністю позиціонування промислових роботів при синтезі спеціалізованих гнучких інтегрованих систем. Монографія / А. Ю. Сазонов, В. А. Кирилович, І. Ю. Черепанська, О. М. Безвесільна. – Житомир : ЖДТУ, 2015. – 271 с.

2. Черепанська І. Ю. Теорія і принципи побудови автоматизованої системи для лінійних і кутових переміщень об'єктів виробництва з використанням математичного апарату кватерніонів і елементів штучного інтелекту. Монографія / І. Ю. Черепанська, В. А. Кирилович, О. М. Безвесільна, А. Ю. Сазонов. – Житомир: ЖДТУ, 2016. – 326 с.

3. Черепанська І. Ю. Штучні нейронні мережі при вирішенні задач у технологічних вимірюваннях, приладобудуванні та проектуванні гнучких виробничих систем. Монографія / І. Ю. Черепанська, О. М. Безвесільна, А. Ю. Сазонов, Т. В. Хильченко. – Житомир: ЖДТУ, 2017. – 217 с.

4. Черепанська І. Ю. Штучні нейронні мережі для вирішення задач технологічної підготовки гнучкого виробництва. Монографія. / І. Ю. Черепанська, О. М. Безвесільна, А. Ю. Сазонов. – Київ: ДП “НВЦ “Пріоритети”, 2018. – 192 с.

Статті у фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

5. Cherepanska I., Automated technological complex to precise angles measurement based on goniometer / I. Cherepanska, E. Bezvesilna, A. Sazonov, A. Lavrishev // Technological Complexes. – 2015. – № 1/2 (12). – P. 38–45. Індексція

Index Copernicus, РИИЦ, Ulrich's Periodicals Directory та ін.

Здобувачем розроблено структурну схему автоматизованого технологічного комплексу високоточного вимірювання кутів на базі гоніометра, що дозволяє реалізувати автоматизовану обробку вимірювальної інформації в режимі реального часу.

6. Черепанська І. Ю. До питання підвищення точності кутових вимірювань гоніометричними системами / І. Ю. Черепанська, О. М. Безвесільна, А. Ю. Сазонов // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Житомир: ЖДТУ. – 2016. – № 1 (76). – С. 92 – 99. Індексція *WorldCat, BASE, eLibrary, Google Scholar*.

Здобувачем проаналізовано, а також представлено сукупністю відповідних компонентів систематичної похибки розроблюваної автоматизованої високоточної гоніометричної системи, за результатами попереднього аналізу джерел її виникнення.

7. Безвесільна О. М. Експериментальні дослідження інтелектуального високоточного термоанемометричного витратоміру біопалива / О. М. Безвесільна, І. Ю. Черепанська, А. Ю. Сазонов, С. О. Нечай // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – № 4/1(30). – С. 22 – 26. Індексція *Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Director, DRIVER, BASE, , РИИЦ, DOAJ, WorldCat, EBSCO, та ін.*

Здобувачем розроблено нейронпроцесор для компенсації динамічних похибок інтелектуального високоточного термоанемометричного витратоміру біопалива.

8. Irina Cherepanska. The procedure for determining the number of measurements in the normalization of random error of an information-measuring system with elements of artificial intelligence / Irina Cherepanska, Elena Bezvesilna, Artem Sazonov, Sergey Nechai, Tatiana Khylenko // Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2017. – № 5/9 (89). – P. 58 – 67. Індексція *Scopus*.

Здобувачем розглянуто особливості процесу оцінки та нормування випадкової складової похибки вимірювання гоніометричної системи з елементами штучного інтелекту; розроблено загальну методіку нормування випадкової складової похибки вимірювання, яка дозволить обґрунтовано

визначати необхідну та достатню кількість повторів вимірювань для досягнення заданої точності.

9. Irina Cherepanska. Development of artificial neural network for determining the components of errors when measuring angles using a goniometric software–hardware complex / Irina Cherepanska, Elena Bezvesilna, Artem Sazonov, Sergey Nechai, Oleksandr Pidtychenko // Eastern–European journal of enterprise technologies. – 2018. – № 9 (95). – P. 43 – 51. Індексція *Scopus*.

Здобувачем розроблено штучну нейронну мережу для визначення складових похибок вимірювання кутів автоматизованими гоніометричними системами.

10. Irina Cherepanska. Intelligent precise goniometric system of analysis of spectral distribution intensities for definition of chemical composition of metal–containing substances / I. Cherepanska, O. Bezvesilna, Yu. Koval, A. Sazonov // Металлофізика и новейшие технологии. – 2019. – Vol. 41. – № 2(41). – P. 263 – 278. Індексція *Scopus*.

Здобувачем розроблено нову прецизійну інтелектуальну гоніометричну систему на базі лазерного гоніометра, CMOS–матриці та штучної нейронної мережі, а також на основі аналізу методу спектроскопії, нейромережевих технологій та фізичних принципів роботи фотолементів.

11. Черепанська І. Ю. Штучна нейронна мережа для автоматизованого розпізнавання складових похибок вимірювання / І. Ю. Черепанська, О. М. Безвесільна, А. Ю. Сазонов // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – Хмельницький: ХНУ. – 2019. – №1 (269). С. 137–145 Індексція *Index Copernicus, Google Scholar, РИНЦ, Polish Scholarly Bibliography*.

Здобувачем розроблено штучну нейронну мережу, яка дозволяє розпізнавати складові похибок вимірювання в режимі реального часу при гоніометричних вимірюваннях величин плоского кута багатогранних призм та є альтернативою традиційному методу дисперсійного аналізу за критерієм Фішера множини вимірювальних даних, а також дозволяє автоматизувати аналіз вимірювальної інформації при нормуванні похибок вимірювання.

12. Черепанська І. Ю. Прецизійна інтелектуальна гоніометрична система / І. Ю. Черепанська, О. М. Безвесільна, А. Ю. Сазонов // Вісник Вінницького

політехнічного інституту. Серія Автоматика та інформаційно-вимірювальна техніка. – Вінницький НТУ. – 2019. – № 2(143). – С. 7 – 14. Индексация *Index Copernicus International, Google Scholar*.

Здобувачем розроблено інтелектуальну гоніометричну систему та штучну нейронну мережу

Статті у фахових виданнях:

13. Черепанська І. Ю. Методична основа системи підтримки прийняття рішень при автоматизованому виборі пристроїв орієнтування / І. Ю. Черепанська, В. А. Кирилович // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Житомир: ЖДТУ. – 2008. – № 4 (47). – С. 147 – 154.

Здобувачем розроблено методику автоматизованого вибору пристроїв орієнтування, як основу системи підтримки прийняття рішень для автоматизації процесу керування вибором пристроїв орієнтування.

14. Черепанська І. Ю. Система підтримки прийняття рішень як основа автоматизованого вибору пристроїв орієнтування / І. Ю. Черепанська, В. А. Кирилович // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Житомир: ЖДТУ. – 2008. – № 3 (46). – С.136–141.

Здобувачем розроблено систему підтримки прийняття рішень, що орієнтована на аналіз значних об'ємів різномірної інформації при автоматизації процесу вибору пристроїв орієнтування для гнучких інтегрованих систем.

15. Черепанська І. Ю. Використання штучних нейронних мереж для задач класифікації пристроїв орієнтування при проектуванні ГІС / І. Ю. Черепанська, В. А. Кирилович // Вестник Севастопольского национального технического университета / Автоматизация процессов и управление. – Севастополь: Изд-во СевНТУ. – 2009. – № 95. – С. 129 – 134.

Здобувачем запропоновано підхід до створення автоматизованої класифікації пристроїв орієнтування з використанням штучних нейронних мереж.

16. Черепанська І. Ю. Програмне забезпечення для автоматизації процесу керування вибором пристроїв орієнтування гнучких інтегрованих систем /

І. Ю. Черепанська, В. А. Кирилович, І. В. Коробійчук // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – Тернопіль: ТДТУ. – 2009. – № 1 (Том 14). – С. 116–122.

Здобувачем розроблено програмне забезпечення для автоматизації процесу вибору пристроїв орієнтування гнучких інтегрованих систем.

17. Черепанська І. Ю. Експериментальне дослідження роботи штучних нейронних мереж для задач класифікації пристроїв орієнтування механоскладальних ГВС / І. Ю. Черепанська, В. А. Кирилович // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. – Житомир: ЖДТУ. – 2009. – № 6. – С. 180 – 191.

Здобувачем проведено експериментальне дослідження роботи розроблених штучних нейронних мереж для задач класифікації пристроїв орієнтування.

18. Черепанська І. Ю. Адаптивність схватів промислових роботів механообробних ГВК / І. Ю. Черепанська, А. Ю. Сазонов, В. А. Кирилович // Методи розв'язування прикладних задач механіки деформівного твердого тіла. – Дніпропетровськ: Наука і освіта. – 2010. – № 11. – С. 119 – 125

Здобувачем визначено напрямки подолання негативного впливу явища "конфлікт сили" на складові технологічної роботизованої системи при підвищенні точності промислових роботів за умов механообробних ГВК.

19. Кирилович В. А. Адаптивність схватів промислових роботів як напрям підвищення ефективності роботизованих механоскладальних технологій / В. А. Кирилович, І. Ю. Черепанська, А. Ю. Сазонов // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Житомир: ЖДТУ. – 2010. – № 1 (52). – С. 17 – 25.

Здобувачем досліджено залежність вартості промислових роботів від величини похибки позиціонування.

20. Кирилович В. А. Формування функціональних моделей маніпуляційних систем промислових роботів / В. А. Кирилович, П. П. Мельничук, О. О. Писарчук, І. Ю. Черепанська // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ. – 2011. – № 42. – С. 118 – 124.

Здобувачем підготовлено теоретичне обґрунтування необхідності

застосування нового математичного апарату кватерніонів для підвищення точності маніпуляційних систем.

21. Черепанська І. Ю. Експериментальне дослідження роботи інтелектуальних моделей прийняття рішень для задач класифікації об'єктів виробництва ГВС / І. Ю. Черепанська, В. А. Кирилович // Технологічні комплекси: науковий журнал. – Луцьк: Видавництво Луцького національного технічного університету. – 2012. – № 1, 2 (5, 6). – С. 255 – 260

Здобувачем розроблено штучні нейронні мережі для задач класифікації об'єктів виробництва ГВС та експериментально досліджено їх роботу.

22. Черепанська І. Ю. Використання штучного інтелекту для керування подачею палива інжекторного двигуна / І. Ю. Черепанська, А. В. Гончаренко // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Житомир: ЖДТУ. – 2014. – № 1 (68). – С. 3 – 11.

Здобувачем розроблено систему інтелектуального керування подачею палива у інжекторний двигун внутрішнього згорання на основі нечіткої логіки.

Патенти України:

23. Патент на корисну модель 124155 (Україна), МПК: G 01 B 21/22 (2006.01). Спосіб вимірювання кутів / І.Ю. Черепанська, О.М. Безвесільна, А.Ю. Сазонов. – Реєстрац. номер заявки u 2017 09792. Заявл. 09.10.2017; Надр. 26.03.2018, Бюл. № 6.

Здобувачу належить основна ідея винаходу.

24. Патент на корисну модель 127373 (Україна), МПК: G 01 B 21/22 (2006.01). Інтелектуальна система вимірювання кутів / І.Ю. Черепанська, О.М. Безвесільна, А.Ю. Сазонов. – Реєстрац. номер заявки u 2018 02424. Заявл. 12.03.2018; Надр. 25.07.2018, Бюл. №14.

Здобувачу належить основна ідея винаходу.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

25. Irina Cherepanska Artificial Neural Network as a Basic Element of the Automated Goniometric System / Irina Cherepanska, Elena Bezvesilna, Artem Sazonov // Recent Advances in Systems, Control and Information Technology. – Warsaw, Poland, 2016. – 827 p. – P. 43–52. (Springer International Publishing AG 2017) <http://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-319-48923-0>.

Здобувачем визначено вхідні та вихідні вектори і структура штучної нейронної мережі.

26. Черепанська І. Ю. Щодо формування інтегрованого показника якості роботизованих механоскладальних технологій / І. Ю. Черепанська, В. А. Кирилович, В. В. Ренькас, В. М. Мосійчук // Тези міжвузівської науково–практичної конференції, присвяченої Дню науки (Житомир, 17–18 травня 2012 р.). – Житомир, ЖДТУ, 2012. – 390 с. – С. 82 – 83.

Здобувачем надано інформацію щодо змісту інтегрованого показника якості.

27. Черепанська І. Ю. Комбінований підхід до точнісної атестації робочих зон промислових роботів / І. Ю. Черепанська, А. Ю. Сазонов, В. А. Кирилович, Є. І. Орлюк // Матеріали четвертої Міжнародної науково-практичної конференції “Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT–2012)”. – Херсон: ХДМА, 2012. – Том. 1. – 290 с. – С. 109 – 111.

Здобувачем розглянуто фактори, що впливають на точність промислових роботів.

28. Черепанська І. Ю. Алгоритмічне забезпечення програмної точнісної атестації робочих зон промислових роботів / І. Ю. Черепанська, А. Ю. Сазонов // Матеріали Всеукраїнської науково – практичної конференції "Сучасні технології промислового комплексу". – Випуск 2. – Херсон: ХНТУ (факультет машинобудування), 2015. – 162 с. – С. 113 – 115.

Здобувачем викладено відомості щодо точності промислових роботів.

29. Черепанська І. Ю. Автоматизація керування нормуванням часу обробки об'єктів виробництва на свердлувальних верстатах / І. Ю. Черепанська, Д. А. Статкевич // Тези I Всеукраїнської науково-технічної конференції “Комп’ютерні технології: інновації, проблеми, рішення” (17–18 травня 2015 року). – Житомир: ЖДТУ, 2015. – 156 с. – С. 101 – 102.

Здобувачу належить ідея застосування штучних нейронних мереж для автоматизації керування нормуванням часу.

30. Черепанська І. Ю. Система підтримки прийняття рішень як основа автоматизованого керування якістю на механообробних підприємствах / І. Ю. Черепанська, О. А. Сусік // Сборник статей научно–информационного

центра “Знание” по материалам XIII международной заочной научно-практической конференции: “Развитие науки в XXI веке” 1 часть, г. Харьков: сборник со статьями (уровень стандарта, академический уровень). – Х.: научно-информационный центр “Знание”, 2016. – 160 с. – С. 126 – 134.

Здобувачем розроблено структурну схему системи підтримки прийняття рішень для автоматизації керування якістю на механообробних підприємствах.

31. Черепанська І. Ю. Автоматизоване вимірювання кутів при упорядкуванні виробничого середовища у гнучких виробничих системах / І. Ю. Черепанська, А. С. Калита, О. О. Омельчак // Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС–2016): матеріали II Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю (м. Дніпро, 1–3 листопада 2016 року) / Міністерство освіти і науки України, Державний вищий навчальний заклад “Український державний хіміко-технологічний університет”. – Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2016. – 302 с. – С. 258 – 261.

Здобувачем сформульовані принципи автоматизації вимірювання кутів.

32. Черепанська І. Ю. Автоматизована система вимірювання геометричних параметрів об'єктів виробництва у машинобудуванні / І. Ю. Черепанська, О. В. Герговський // Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС–2016): матеріали II Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю (м. Дніпро, 1–3 листопада 2016 року) / Міністерство освіти і науки України, Державний вищий навчальний заклад “Український державний хіміко-технологічний університет”. – Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2016. – 302 с. – С. 261 – 263.

Здобувачем проведено аналітичний огляд систем вимірювання геометричних параметрів об'єктів виробництва у машинобудуванні.

33. Черепанська І. Ю. Інтелектуальний високоточний термоанемометричний витратомір біопалива / І. Ю. Черепанська, О. М. Безвесільна, А. Ю. Сазонов, О. О. Добржанський // Метрологія, технічне регулювання, якість: досягнення та перспективи: матеріали Шостої Міжнародної науково-практичної конференції (Одеса, 11–12 жовтня 2016 р.); Одеська державна академія технічного регулювання та якості. – Одеса: Бондаренко М. О., 2016. – 266 с. – С. 164 – 166.

Здобувачем проведено дослідження точності високоточного

термоанемометричного витратоміру біопалива.

34. Cherepanska I. Decision support system as the basis of automated quality control in mechanical engineering / Irina Cherepanska, Alexander Susik, Artem Sazonov // System Control and Information Technology. – Warsaw. – 20–21.05.2016

Здобувачем розроблено структурну схему штучної нейронної мережі.

35. Черепанська І.Ю. Дослідження характеристик апаратної та часової складності логічних елементів “виключаюче АБО” та “провідне І” як компонентів обчислювальних засобів систем моніторингу об’єктів управління / А.Ю. Сазонов, І.Ю. Черепанська, Д.О. Осіпов // Автоматизоване управління багатовимірними об’єктами на засадах обчислювального інтелекту: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції (Івано-Франківськ, 17 – 19 жовтня 2018 року) / Міністерство освіти і науки України, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу (ІФНТУНГ), Науково-дослідний і проектний інститут ПАТ “Укрнафта”, ТЗОВ “Івано-Франківське спеціальне конструкторське бюро засобів автоматизації”, ТЗОВ “Мікрол”. – Івано-Франківськ. – 2018. – 250 с. – С. 54 – 56.

Здобувачем проведено аналітичний огляд апаратної та часової складності логічних елементів.

36. Черепанська І.Ю. Прецизійна приладова система вимірювання кутів / І.Ю. Черепанська, О.М. Безвесільна, А.Ю. Сазонов // Aktuelle themen im kontext der entwicklung der modernen wissenschaften: Zu den materialien der internationalen wissenschaftlich-praktischen konferenz (Dresden, 23 Januar, 2019). – Dresden: NGO «Europäische Wissenschaftsplattform». – 2019. – V. 5. – 122 p. – P. 79 – 82.

Здобувачем сформульовані принципи побудови прецизійної приладової системи вимірювання кутів.

37. Cherepanska Irin. Neural network technology for recognizing errors components of the precise instrumental goniometric system / Cherepanska Irina, Bezvesilna Olena, Sazonov Artem // La science et la technologie à l'ère de la société de l'information: coll. de papiers scientifiques “ΛΟΓΟΣ” avec des matériaux de la conf. scientifique et pratique internationale, (Bordeaux, 3 mars, 2019). – Bordeaux : OP “Plateforme scientifique européenne”, 2019. – V.9. – 106 p. – P. 43 – 47.

Здобувачем розроблено штучну нейронну мережу та досліджено її роботу.


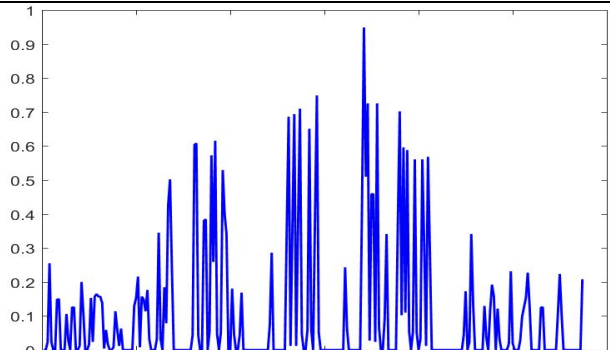
Додаток Г

Фрагмент навчальної бази даних для навчання штучної нейронної мережі автоматичного розпізнавання хімічних елементів для експрес аналізу інтенсивностей спектрального розподілу хімічних речовин при визначення їх вмісту у складі металовмісних матеріалів


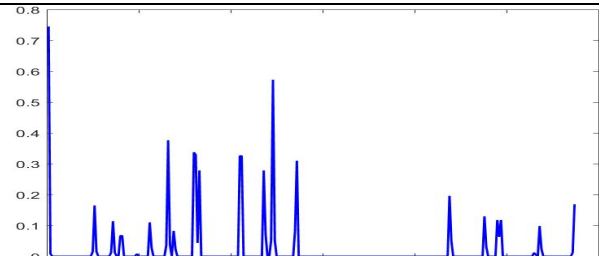
Таблиця Г.1

[illegible]


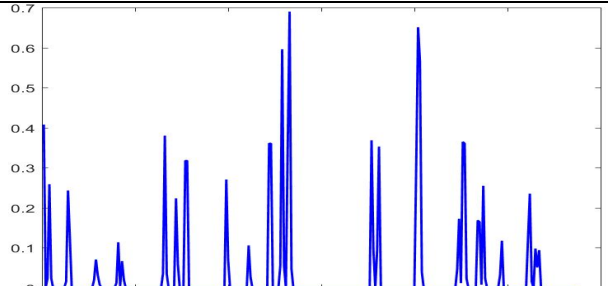
Продовження табл. Г.1

Назва хімічного елементу / Компонента вихідного вектору Y	Інтенсивність спектрального розподілу	Графік інтенсивностей спектрального розподілу											
Барій (Ba)– y ₂													
Нормалізовані значення інтенсивностей спектрального розподілу / Вхідний вектор навчальної множини													
0	0	0,023529412	0,254901961	0,023529412	0	0	0,149019608	0,149019608	0	0	0	0,105882353	0,02745098
	0	0,125490196	0,125490196	0	0	0,011764706	0,2	0,105882353	0	0	0,015686275	0,152941176	0,023529412
	0,156862745	0,164705882	0,156862745	0,156862745	0,137254902	0,003921569	0,058823529	0,015686275	0	0	0,007843137		
	0,11372549	0,058823529	0,011764706	0,062745098	0	0	0	0	0	0,129411765	0,152941176	0,215686275	
	0,007843137	0,156862745	0,149019608	0,11372549	0,176470588	0,031372549	0	0	0	0,031372549	0,345098039		
	0,031372549	0	0,184313725	0,078431373	0,423529412	0,501960784	0,239215686	0	0	0	0	0	0
	0	0	0,043137255	0,603921569	0,607843137	0,043137255	0	0	0,380392157	0,384313725	0	0,054901961	
	0,57254902	0,258823529	0,615686275	0,047058824	0	0,050980392	0,529411765	0,4	0,341176471	0	0	0,180392157	
	0,047058824	0	0	0,043137255	0,168627451	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0,074509804	0,28627451	0	0	0	0	0	0,356862745	0,68627451	0,011764706		
	0,356862745	0,694117647	0,011764706	0,360784314	0,709803922	0,047058824	0	0	0,058823529	0,650980392	0,058823529		
	0	0,392156863	0,749019608	0,050980392	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,243137255	0,062745098	0	0	0	0	0	0,439215686	0,949019608	0,509803922	0,725490196		
	0,02745098	0,458823529	0,458823529	0,023529412	0,725490196	0,066666667	0	0	0,090196078	0,341176471	0	0	
	0	0	0,37254902	0,701960784	0,101960784	0,596078431	0,109803922	0,588235294	0,054901961	0	0,050980392		
	0,560784314	0,050980392	0	0,031372549	0,560784314	0,305882353	0,011764706	0,568627451	0,294117647	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0,043137255	0,17254902	0		
	0,023529412	0,341176471	0,133333333	0	0	0	0	0,035294118	0	0,11372549	0,192156863		
	0,156862745	0	0,121568627	0,031372549	0	0	0	0,231372549	0,019607843	0	0	0	
	0,02745098	0,098039216	0,125490196	0,152941176	0,22745098	0,125490196	0	0	0	0	0,125490196		
	0,125490196	0	0	0	0	0	0,105882353	0,223529412	0,101960784	0	0	0	0
	0	0	0	0	0,207843137								


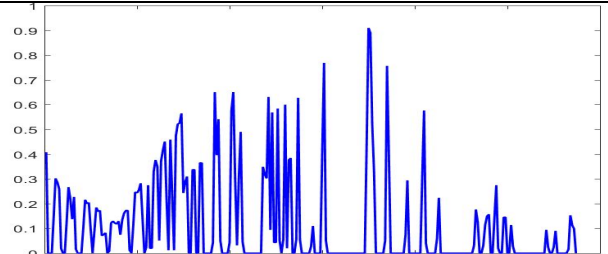
Продовження табл. Г.1

Назва хімічного елементу / Компонента вихідного вектору Y	Інтенсивність спектрального розподілу	Графік інтенсивностей спектрального розподілу																		
Берилій (Be) – y ₃																				
Нормалізовані значення інтенсивностей спектрального розподілу / Вхідний вектор навчальної множини																				
0,745098039	0,007843137	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0,015686275	0,164705882	0,015686275	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,011764706			
0,11372549	0,011764706	0	0	0,066666667	0,066666667	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,007843137	0				
0	0	0	0	0,109803922	0,02745098	0	0	0	0	0	0	0	0	0,035294118	0,376470588					
0,035294118	0	0,082352941	0,023529412	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,337254902	0,329411765					
0,043137255	0,278431373	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0,325490196	0,325490196	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,278431373	0,070588235	0	0	0,050980392	0,57254902	0,050980392	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0,082352941	0,309803922	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0,196078431	0,050980392	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,129411765	0,031372549	0	0	0	0	0	0	0,117647059				
0,062745098	0,117647059	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0,011764706	0,003921569	0	0,098039216	0,023529412	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0,011764706	0,168627451														


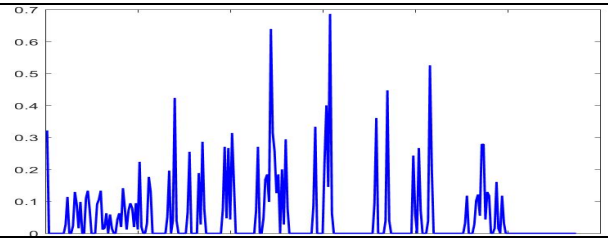
Продовження табл. Г.1

Назва хімічного елементу / Компонента вихідного вектору Y	Інтенсивність спектрального розподілу	Графік інтенсивностей спектрального розподілу
Кадмій (Cd) – y ₆		
Нормалізовані значення інтенсивностей спектрального розподілу / Вхідний вектор навчальної множини		
0,407843137 0 0,023529412 0,258823529 0,023529412 0 0 0 0 0 0 0 0,015686275 0,243137255		
0,125490196 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0,019607843 0,070588235 0,031372549		
0,007843137 0 0 0 0 0 0 0 0 0,011764706 0,11372549 0,003921569 0,066666667 0,019607843		
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0		
0,035294118 0,380392157 0,035294118 0 0 0 0 0,223529412 0,058823529 0 0 0 0,317647059		
0,317647059 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0		
0 0 0,270588235 0,070588235 0 0 0 0 0 0 0 0 0,105882353 0,02745098 0		
0 0 0 0 0 0 0,360784314 0,360784314 0 0 0 0 0,054901961 0,596078431		
0,054901961 0 0,360784314 0,690196078 0,047058824 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0		
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0		
0 0 0 0 0 0 0 0 0,368627451 0,094117647 0 0,094117647 0,352941176 0 0		
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0,309803922 0,650980392		
0,564705882 0,039215686 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0		
0 0 0,047058824 0,17254902 0,011764706 0,364705882 0,360784314 0,023529412 0 0 0 0 0 0,168627451		
0,164705882 0,007843137 0,254901961 0,023529412 0 0 0 0 0 0 0,031372549 0,117647059 0		
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0,121568627 0,235294118 0,015686275 0 0,098039216		
0,050980392 0,094117647 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0		
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0		


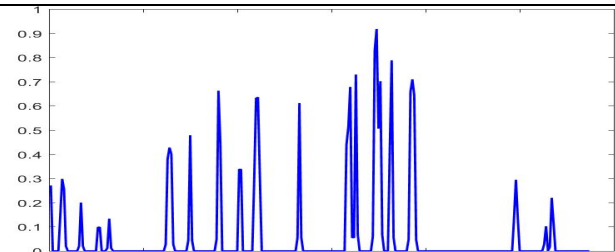
Продовження табл. Г.1

Назва хімічного елементу / Компонента вихідного вектору Y	Інтенсивність спектрального розподілу	Графік інтенсивностей спектрального розподілу										
Цезій (Cs) – y ₇												
Нормалізовані значення інтенсивностей спектрального розподілу / Вхідний вектор навчальної множини												
0,407843137	0	0	0	0,145098039	0,301960784	0,28627451	0,258823529	0,019607843	0	0	0,125490196	0,266666667
0,219607843	0,137254902	0,22745098	0,015686275	0	0	0	0,101960784	0,215686275	0,2	0,203921569	0,094117647	
0	0,090196078	0,184313725	0,168627451	0,17254902	0,070588235	0,074509804	0,082352941	0	0,007843137	0,121568627		
0,129411765	0,121568627	0,117647059	0,129411765	0,074509804	0,133333333	0,160784314	0,17254902	0,17254902	0,011764706			
0	0,11372549	0,247058824	0,243137255	0,254901961	0,282352941	0,137254902	0	0,023529412	0,274509804	0,019607843		
0,019607843	0,329411765	0,376470588	0,349019608	0,050980392	0,37254902	0,415686275	0,450980392	0,211764706	0,011764706			
0,458823529	0,231372549	0,011764706	0,474509804	0,521568627	0,525490196	0,564705882	0,243137255	0,28627451	0,309803922			
0	0	0,337254902	0,337254902	0	0	0,364705882	0,364705882	0	0	0	0,043137255	
0,650980392	0,396078431	0,541176471	0,050980392	0	0	0	0	0,043137255	0,576470588	0,650980392	0,298039216	
0,031372549	0,305882353	0,490196078	0,047058824	0	0	0	0	0	0	0	0,349019608	
0,317647059	0,301960784	0,631372549	0,094117647	0,568627451	0,043137255	0,043137255	0,584313725	0,050980392	0			
0,054901961	0,6	0,019607843	0,376470588	0,384313725	0	0	0,054901961	0,62745098	0,054901961	0	0	0
0	0	0,02745098	0,109803922	0	0	0	0,4	0,768627451	0,050980392	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,435294118	0,909803922
0,890196078	0,525490196	0,325490196	0	0	0	0	0,050980392	0,756862745	0,396078431	0	0	0
0	0	0	0	0,074509804	0,294117647	0	0	0	0	0	0,301960784	0,576470588
0,039215686	0	0	0	0	0,058823529	0,223529412	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0,031372549	0,176470588	0,125490196	0	0	0,031372549
0,11372549	0,149019608	0,156862745	0	0	0,141176471	0,274509804	0,019607843	0	0	0,145098039	0,145098039	
0	0	0,11372549	0,02745098	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0,094117647	0,023529412	0	0	0,023529412	0,090196078	0	0	0	0
0,015686275	0,152941176	0,11372549	0,098039216	0								


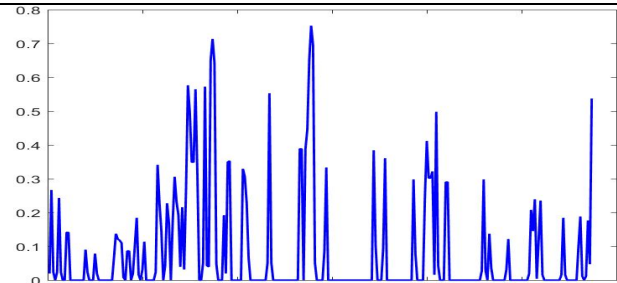
Продовження табл. Г.1

Назва хімічного елементу / Компонента вихідного вектору Y	Інтенсивність спектрального розподілу	Графік інтенсивностей спектрального розподілу													
Кальцій (Ca) – y ₈															
Нормалізовані значення інтенсивностей спектрального розподілу / Вхідний вектор навчальної множини															
0,321568627	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,02745098	0,11372549	0	0	0,023529412	0,129411765
0,090196078	0,015686275	0,098039216	0	0	0,109803922	0,133333333	0,074509804	0	0	0	0,090196078	0,043137255	0	0	0,043137255
0,105882353	0,133333333	0,011764706	0,015686275	0,062745098	0	0,058823529	0,015686275	0	0	0,043137255	0,094117647	0,078431373	0,019607843	0,094117647	0,094117647
0,062745098	0,019607843	0,141176471	0,078431373	0,011764706	0,070588235	0,094117647	0,078431373	0,019607843	0,094117647	0,078431373	0,019607843	0,094117647	0,078431373	0,019607843	0,094117647
0,011764706	0,223529412	0,019607843	0	0	0,031372549	0,176470588	0,129411765	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0,050980392	0,196078431	0	0,039215686	0,423529412	0,039215686	0	0	0	0	0	0	0	0,066666667
0,254901961	0	0	0	0	0,188235294	0,02745098	0,28627451	0,074509804	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0,074509804	0,270588235	0,047058824	0,266666667	0,043137255	0,31372549	0,156862745	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0,070588235	0,270588235	0	0	0,047058824	0,168627451	0,184313725	0,078431373	0,078431373	0,078431373
0,098039216	0,639215686	0,31372549	0,254901961	0,125490196	0,184313725	0	0,2	0,02745098	0,294117647	0,078431373	0,078431373	0,078431373	0,078431373	0,078431373	0,078431373
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,08627451	0,333333333	0	0	0	0	0
0	0,223529412	0,4	0,145098039	0,68627451	0,062745098	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,094117647	0,360784314	0	0	0	0	0
0,039215686	0,447058824	0,039215686	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,243137255
0,062745098	0	0,266666667	0,070588235	0	0	0	0,039215686	0,525490196	0,2	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,031372549	0,117647059	0	0	0	0	0	0
0,02745098	0,101960784	0,121568627	0,054901961	0,278431373	0,278431373	0,043137255	0,129411765	0,117647059	0	0	0	0	0	0	0
0,015686275	0,160784314	0,015686275	0	0,117647059	0,031372549	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

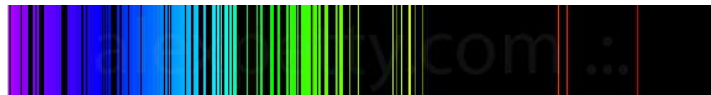
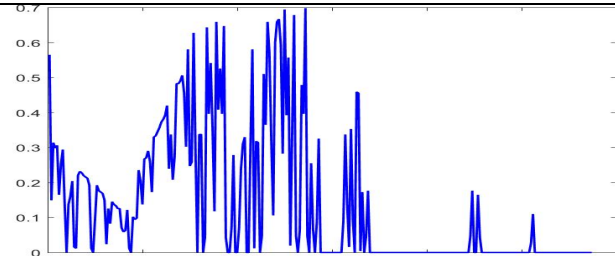
Продовження табл. Г.1

Назва хімічного елементу / Компонента вихідного вектору Y	Інтенсивність спектрального розподілу	Графік інтенсивностей спектрального розподілу												
Вуглець (C) – y ₉														
Нормалізовані значення інтенсивностей спектрального розподілу / Вхідний вектор навчальної множини														
0,270588235	0	0	0	0	0,145098039	0,298039216	0,254901961	0,019607843	0	0	0	0	0	0
0,019607843	0,2	0,019607843	0	0	0	0	0	0	0,098039216	0,098039216	0	0	0	0,011764706
0,133333333	0,011764706	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,02745098	0,380392157	0,42745098	0,4	0,02745098	0
0	0	0	0	0	0	0,043137255	0,478431373	0,043137255	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0,047058824	0,662745098	0,447058824	0	0	0	0	0	0	0	0	0,337254902
0,337254902	0	0	0	0	0	0,298039216	0,631372549	0,635294118	0,305882353	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,054901961	0,611764706	0,054901961	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0,439215686	0,51372549	0,678431373	0,054901961	0,054901961	0,729411765	0,066666667	0	0	0	0	0	0	0
0	0,058823529	0,82745098	0,917647059	0,505882353	0,701960784	0,066666667	0	0	0	0,411764706	0,788235294	0	0	0
0,054901961	0	0	0	0	0	0	0,047058824	0,658823529	0,709803922	0,643137255	0,047058824	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0,137254902	0,294117647	0,133333333	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0,02745098	0,101960784	0	0,015686275	0,219607843	0,11372549	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0


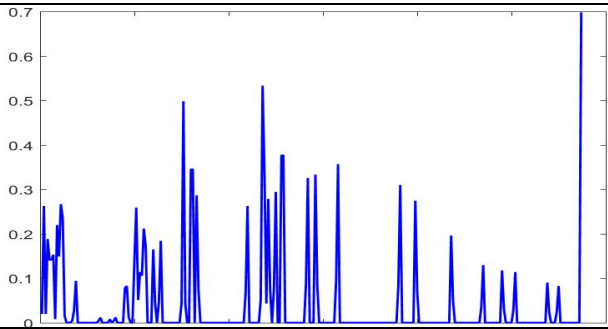
Продовження табл. Г.1

Назва хімічного елементу / Компонента вихідного вектору Y	Інтенсивність спектрального розподілу	Графік інтенсивностей спектрального розподілу										
Хлор (Cl) – y ₁₀												
Нормалізовані значення інтенсивностей спектрального розподілу / Вхідний вектор навчальної множини												
0,019607843	0,266666667	0,023529412	0	0,023529412	0,243137255	0,023529412	0	0	0,141176471	0,141176471	0	0
0	0	0	0	0	0,090196078	0,023529412	0	0	0,078431373	0,019607843	0	0
0	0	0	0	0,066666667	0,137254902	0,121568627	0,117647059	0,109803922	0,007843137	0	0,08627451	0
0,08627451	0	0,019607843	0,101960784	0,184313725	0,015686275	0	0,031372549	0,11372549	0	0	0	0
0	0,023529412	0,341176471	0,22745098	0,145098039	0	0,043137255	0,22745098	0,168627451	0	0,176470588	0	0
0,305882353	0,231372549	0,192156863	0,039215686	0,215686275	0,031372549	0,266666667	0,576470588	0,494117647	0,349019608	0	0	0
0,349019608	0,564705882	0,309803922	0	0	0,050980392	0,57254902	0,043137255	0,039215686	0,650980392	0,71372549	0	0
0,643137255	0,047058824	0	0	0	0,192156863	0,019607843	0,349019608	0,352941176	0	0	0	0
0	0,329411765	0,305882353	0,22745098	0,066666667	0	0	0	0	0	0	0,050980392	0
0,552941176	0,050980392	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,388235294
0,388235294	0	0,388235294	0,447058824	0,650980392	0,752941176	0,694117647	0,050980392	0	0	0	0	0
0,08627451	0,333333333	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0,384313725	0,101960784	0	0	0,094117647	0,360784314	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,298039216	0,078431373	0	0
0	0,243137255	0,411764706	0,301960784	0,301960784	0,321568627	0,015686275	0,498039216	0,043137255	0	0	0	0
0,290196078	0,290196078	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0,02745098	0,298039216	0,02745098	0	0,137254902	0,035294118	0	0	0	0	0	0
0,031372549	0,121568627	0	0	0	0	0	0	0	0,019607843	0,207843137	0,145098039	0
0,239215686	0,003921569	0,117647059	0,235294118	0,015686275	0	0	0	0	0	0	0	0
0,015686275	0,184313725	0,015686275	0	0	0	0	0,098039216	0,188235294	0,011764706	0	0	0
0,011764706	0,176470588	0,047058824	0,537254902	0	0	0	0	0	0	0	0	0


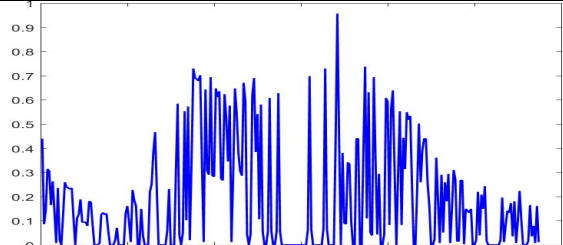
Продовження табл. Г.1

Назва хімічного елементу / Компонента вихідного вектору Y	Інтенсивність спектрального розподілу	Графік інтенсивностей спектрального розподілу											
Хром (Cr) – y ₁₁													
Нормалізовані значення інтенсивностей спектрального розподілу / Вхідний вектор навчальної множини													
0,564705882	0,149019608	0,31372549	0,298039216	0,305882353	0,164705882	0,250980392	0,294117647	0,137254902	0	0,137254902			
0,160784314	0,203921569	0,015686275	0,011764706	0,219607843	0,231372549	0,22745098	0,219607843	0,215686275	0,211764706				
0,192156863	0,011764706	0	0,094117647	0,192156863	0,176470588	0,17254902	0,168627451	0,149019608	0,023529412				
0,125490196	0,082352941	0,145098039	0,137254902	0,133333333	0,125490196	0,125490196	0,070588235	0,058823529	0,062745098				
0,121568627	0,011764706	0	0,101960784	0,094117647	0,098039216	0,235294118	0,203921569	0,137254902	0,266666667				
0,270588235	0,290196078	0,258823529	0,17254902	0,329411765	0,333333333	0,345098039	0,356862745	0,37254902	0,380392157				
0,392156863	0,419607843	0,239215686	0,337254902	0,207843137	0,274509804	0,482352941	0,482352941	0,490196078	0,505882353				
0,454901961	0,301960784	0,580392157	0,247058824	0,258823529	0,62745098	0,290196078	0	0,337254902	0,337254902	0			
0,043137255	0,643137255	0,396078431	0,541176471	0,349019608	0,117647059	0,658823529	0,407843137	0,525490196	0,396078431				
0,647058824	0,043137255	0	0	0,070588235	0,278431373	0	0	0,070588235	0,239215686	0,309803922	0,329411765		
0	0	0,301960784	0,580392157	0,011764706	0,317647059	0,31372549	0	0,047058824	0,509803922	0,364705882			
0,658823529	0,568627451	0,31372549	0,105882353	0,6	0,658823529	0,666666667	0,592156863	0,282352941	0,694117647				
0,392156863	0,556862745	0,019607843	0,345098039	0,678431373	0,047058824	0	0,062745098	0,478431373	0,396078431				
0,698039216	0,047058824	0	0,254901961	0,066666667	0	0,08627451	0,325490196	0	0	0	0		
0	0	0	0	0,090196078	0,337254902	0,137254902	0,015686275	0,352941176	0,094117647	0			
0,458823529	0,454901961	0,003921569	0,17254902	0	0,047058824	0,176470588	0	0	0	0	0		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	0	0	0	0,047058824	0,176470588	0	0	0,164705882	0,043137255	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0,02745098	0,109803922	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0


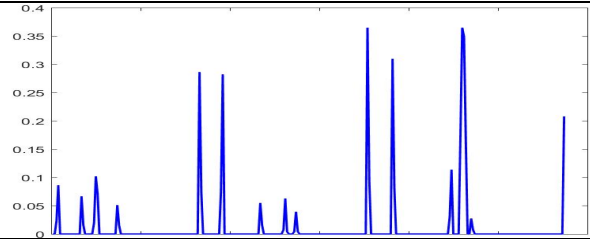
Продовження табл. Г.1

Назва хімічного елементу / Компонента вихідного вектору Y	Інтенсивність спектрального розподілу	Графік інтенсивностей спектрального розподілу
Кобальт (Co) – y ₁₂		
Нормалізовані значення інтенсивностей спектрального розподілу / Вхідний вектор навчальної множини		
0,019607843 0,262745098 0,019607843 0,188235294 0,141176471 0,141176471 0,152941176 0,007843137 0,219607843 0,149019608 0,266666667 0,235294118 0,015686275 0 0 0 0,003921569 0,02745098 0,094117647 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0,003921569 0,011764706 0 0 0 0 0,007843137 0 0,003921569 0,011764706 0 0 0 0 0 0,078431373 0,082352941 0,011764706 0 0 0,137254902 0,258823529 0,050980392 0,11372549 0,105882353 0,211764706 0,17254902 0 0 0 0,164705882 0,043137255 0 0,047058824 0,184313725 0 0 0 0 0 0 0 0 0,043137255 0,498039216 0,043137255 0 0 0,345098039 0,345098039 0 0,28627451 0,074509804 0,066666667 0,262745098 0 0 0 0 0 0,050980392 0,533333333 0,333333333 0,043137255 0,278431373 0,074509804 0 0,074509804 0,294117647 0 0 0,376470588 0,376470588 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0,08627451 0,325490196 0 0 0 0,333333333 0,08627451 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0,094117647 0,356862745 0,082352941 0,309803922 0 0 0 0 0 0 0,274509804 0,070588235 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0,196078431 0,050980392 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0,035294118 0,129411765 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0,117647059 0,031372549 0 0 0 0 0,02745098 0,11372549 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0,090196078 0,023529412 0 0 0 0,023529412 0,082352941 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0,698039216		

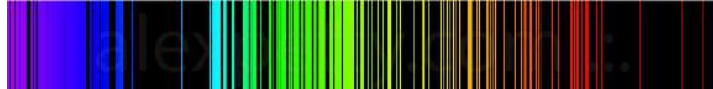
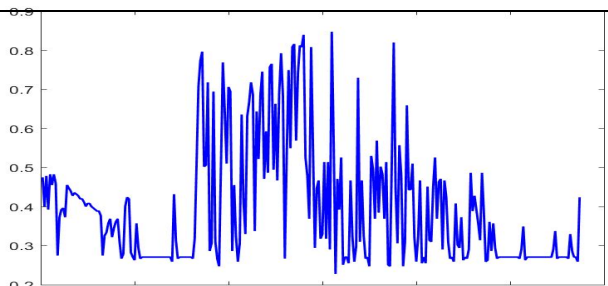
Продовження табл. Г.1

Назва хімічного елементу / Компонента вихідного вектору Y	Інтенсивність спектрального розподілу	Графік інтенсивностей спектрального розподілу
Мідь (Cu) – y ₁₃		
Нормалізовані значення інтенсивностей спектрального розподілу / Вхідний вектор навчальної множини		
0,439215686 0,08627451 0,141176471 0,31372549 0,305882353 0,164705882 0,262745098 0,141176471 0,007843137 0,235294118		
0,019607843 0 0,125490196 0,258823529 0,239215686 0,235294118 0,231372549 0,235294118 0,109803922 0 0,109803922		
0,125490196 0,188235294 0,094117647 0,094117647 0,094117647 0,078431373 0,180392157 0,176470588 0,082352941 0 0		
0 0,007843137 0,125490196 0,133333333 0,125490196 0,129411765 0,058823529 0 0 0 0,019607843 0,070588235		
0 0 0 0 0,129411765 0,160784314 0,094117647 0,011764706 0,22745098 0,184313725 0,160784314 0 0		
0,149019608 0,039215686 0 0 0 0,219607843 0,250980392 0,384313725 0,466666667 0,223529412 0 0 0		
0 0 0,058823529 0,231372549 0 0 0 0,305882353 0,584313725 0,039215686 0 0,050980392 0,552941176		
0,101960784 0,57254902 0,019607843 0,341176471 0,729411765 0,690196078 0,68627451 0,678431373 0,701960784 0,329411765		
0,011764706 0,643137255 0,305882353 0,290196078 0,694117647 0,28627451 0,282352941 0,647058824 0,611764706 0,635294118		
0,274509804 0,266666667 0,623529412 0,521568627 0,345098039 0,576470588 0,011764706 0,298039216 0,647058824 0,545098039		
0,380392157 0,305882353 0,28627451 0,670588235 0,596078431 0,043137255 0 0,043137255 0,615686275 0,690196078		
0,384313725 0,541176471 0,105882353 0,580392157 0,054901961 0 0 0,054901961 0,607843137 0,054901961 0 0		
0,054901961 0,62745098 0,054901961 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0		
0 0,062745098 0,698039216 0,062745098 0 0 0 0 0 0 0,066666667 0,729411765 0,066666667 0		
0 0 0 0,435294118 0,956862745 0,439215686 0 0,380392157 0,090196078 0,08627451 0,341176471 0,333333333		
0,094117647 0 0 0,439215686 0,439215686 0 0 0,388235294 0,737254902 0,109803922 0,631372549 0,050980392		
0,039215686 0,694117647 0,352941176 0,043137255 0,294117647 0 0 0,043137255 0,607843137 0,592156863 0,082352941		
0,564705882 0,639215686 0,301960784 0 0,290196078 0,552941176 0,082352941 0,443137255 0,31372549 0,549019608		
0,517647059 0,533333333 0,250980392 0 0 0,235294118 0,501960784 0,258823529 0,392156863 0,439215686 0,439215686		
0,254901961 0,160784314 0 0 0,023529412 0,360784314 0,184313725 0,007843137 0,290196078 0,050980392 0,258823529		
0,180392157 0,294117647 0,007843137 0,145098039 0,309803922 0,270588235 0,015686275 0,015686275 0,266666667 0,266666667		
0,003921569 0,149019608 0,141176471 0,133333333 0,149019608 0 0 0,019607843 0,219607843 0,039215686 0,207843137		
0,149019608 0,243137255 0,015686275 0 0 0 0 0 0 0,019607843 0,196078431 0,011764706		
0,082352941 0,141176471 0,133333333 0,17254902 0,035294118 0,180392157 0,007843137 0,101960784 0,223529412 0,101960784		
0 0 0 0,015686275 0,164705882 0,035294118 0,078431373 0,007843137 0,160784314 0,011764706		


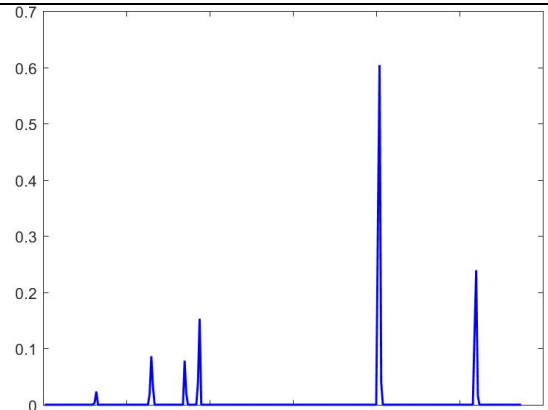
Продовження табл. Г.1

Назва хімічного елементу / Компонента вихідного вектору Y	Інтенсивність спектрального розподілу	Графік інтенсивностей спектрального розподілу																
Галій (Ga) – y ₁₄																		
Нормалізовані значення інтенсивностей спектрального розподілу / Вхідний вектор навчальної множини																		
0	0	0,023529412	0,08627451	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,066666667		
	0,015686275	0	0	0	0	0	0,019607843	0,101960784	0,070588235	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0,050980392	0,015686275	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,28627451	0,074509804	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0,074509804	0,282352941	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0,054901961	0,015686275	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0,007843137	0,062745098	0,003921569	0	0	0	0	0,003921569	0,039215686	0,003921569	0			
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,364705882		
	0,094117647	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,309803922	0,082352941	0	0		
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0,031372549	0,11372549	0	0	0	0	0,176470588	0,364705882			
	0,349019608	0,164705882	0	0	0,02745098	0,007843137	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,207843137																	


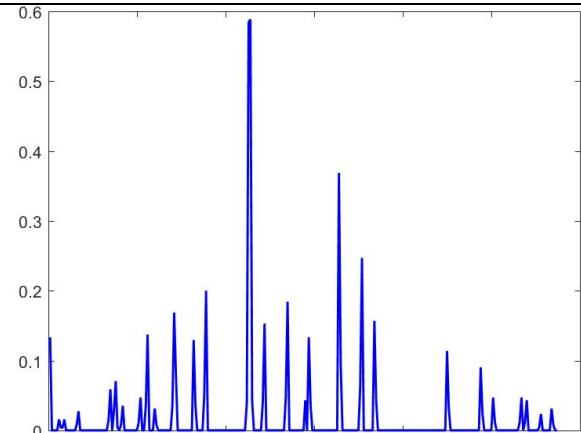
Продовження табл. Г.1

Назва хімічного елементу / Компонента вихідного вектору Y	Інтенсивність спектрального розподілу					Графік інтенсивностей спектрального розподілу				
Залізо (Fe) – y ₁₆										
Нормалізовані значення інтенсивностей спектрального розподілу / Вхідний вектор навчальної множини										
0,474509804	0,4	0,478431373	0,392156863	0,482352941	0,454901961	0,482352941	0,458823529	0,274509804	0,37254902	0,392156863
0,396078431	0,37254902	0,37254902	0,454901961	0,447058824	0,439215686	0,42745098	0,435294118	0,431372549	0,42745098	0,419607843
0,419607843	0,411764706	0,4	0,407843137	0,407843137	0,4	0,396078431	0,392156863	0,388235294	0,388235294	0,376470588
0,274509804	0,325490196	0,333333333	0,356862745	0,368627451	0,321568627	0,321568627	0,345098039	0,360784314	0,368627451	0,309803922
0,266666667	0,278431373	0,4	0,423529412	0,419607843	0,282352941	0,270588235	0,262745098	0,356862745	0,294117647	
0,266666667	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235
0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,258823529	0,431372549	0,31372549
0,266666667	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,266666667	0,317647059
0,509803922	0,705882353	0,77254902	0,796078431	0,501960784	0,505882353	0,717647059	0,28627451	0,305882353	0,694117647	0,28627451
0,309803922	0,266666667	0,247058824	0,505882353	0,768627451	0,643137255	0,509803922	0,705882353	0,694117647	0,28627451	0,28627451
0,454901961	0,321568627	0,258823529	0,305882353	0,635294118	0,411764706	0,329411765	0,631372549	0,666666667	0,717647059	0,717647059
0,68627451	0,337254902	0,643137255	0,521568627	0,68627451	0,745098039	0,470588235	0,592156863	0,48627451	0,756862745	0,756862745
0,764705882	0,494117647	0,662745098	0,466666667	0,690196078	0,792156863	0,682352941	0,266666667	0,529411765	0,749019608	0,749019608
0,549019608	0,807843137	0,815686275	0,568627451	0,741176471	0,811764706	0,807843137	0,839215686	0,525490196	0,478431373	0,478431373
0,368627451	0,807843137	0,549019608	0,294117647	0,447058824	0,466666667	0,317647059	0,329411765	0,51372549	0,317647059	0,317647059
0,51372549	0,290196078	0,847058824	0,57254902	0,22745098	0,470588235	0,392156863	0,525490196	0,250980392	0,270588235	0,270588235
0,270588235	0,254901961	0,466666667	0,321568627	0,258823529	0,298039216	0,729411765	0,309803922	0,466666667	0,325490196	0,325490196
0,266666667	0,270588235	0,247058824	0,529411765	0,494117647	0,368627451	0,568627451	0,384313725	0,501960784	0,482352941	0,482352941
0,368627451	0,51372549	0,250980392	0,247058824	0,525490196	0,819607843	0,443137255	0,305882353	0,556862745	0,478431373	0,478431373
0,247058824	0,309803922	0,658823529	0,443137255	0,443137255	0,509803922	0,321568627	0,258823529	0,321568627	0,466666667	0,466666667
0,254901961	0,270588235	0,254901961	0,450980392	0,31372549	0,309803922	0,450980392	0,525490196	0,368627451	0,462745098	0,462745098
0,470588235	0,290196078	0,466666667	0,423529412	0,309803922	0,266666667	0,270588235	0,258823529	0,407843137	0,301960784	0,301960784
0,294117647	0,37254902	0,262745098	0,270588235	0,266666667	0,290196078	0,48627451	0,388235294	0,42745098	0,392156863	0,392156863
0,356862745	0,31372549	0,48627451	0,384313725	0,258823529	0,262745098	0,360784314	0,28627451	0,356862745	0,294117647	0,294117647
0,266666667	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235
0,270588235	0,270588235	0,266666667	0,290196078	0,349019608	0,262745098	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235
0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235
0,290196078	0,337254902	0,266666667	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,270588235	0,266666667	0,329411765
0,28627451	0,270588235	0,270588235	0,258823529	0,423529412						

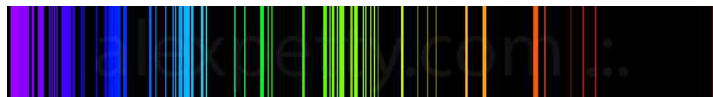
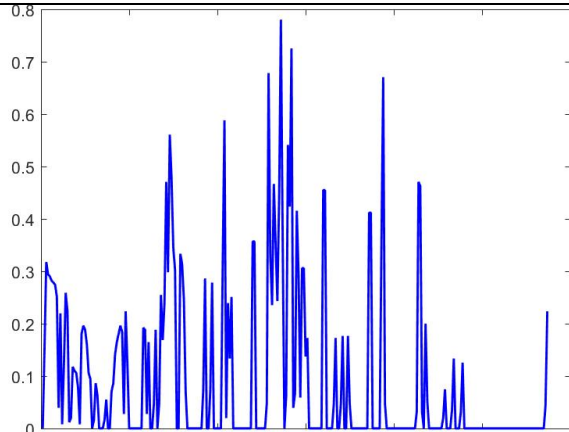
Продовження табл. Г.1

Назва хімічного елементу / Компонента вихідного вектору Y	Інтенсивність спектрального розподілу	Графік інтенсивностей спектрального розподілу																		
Літій (Li) – y ₁₇																				
Нормалізовані значення інтенсивностей спектрального розподілу / Вхідний вектор навчальної множини																				
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,003921569	0,023529412	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0,019607843	0,08627451	0,031372549	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0,078431373	0,019607843	0	0	0	0	0	0	0	0,039215686	0	0	0
	0,152941176	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,125490196	0,239215686	0,015686275	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0																				


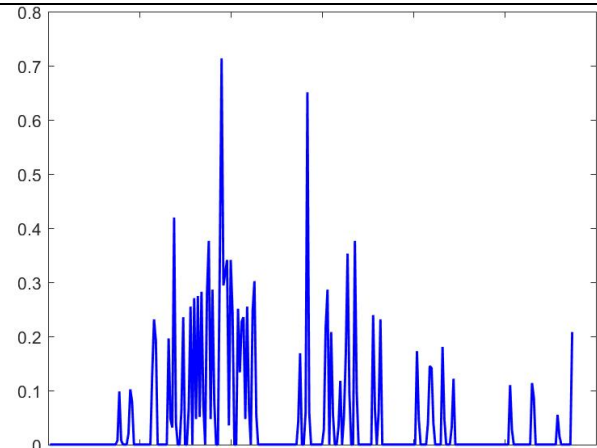
Продовження табл. Г.1

Назва хімічного елементу / Компонента вихідного вектору Y	Інтенсивність спектрального розподілу	Графік інтенсивностей спектрального розподілу														
Магній (Mg) – y ₁₈																
Нормалізовані значення інтенсивностей спектрального розподілу / Вхідний вектор навчальної множини																
0,13333333	0	0	0	0	0,015686275	0,003921569	0,003921569	0,015686275	0	0	0	0	0	0	0	0
0,007843137	0,02745098	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,015686275	0,058823529	0	0,02745098	0,070588235	0,003921569	0	0,007843137	0,035294118	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0,011764706	0,047058824	0	0	0,035294118	0,137254902	0	0	0	0,031372549			
0,007843137	0	0	0	0	0	0	0	0,035294118	0,168627451	0,078431373	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0,129411765	0,035294118	0	0	0	0,050980392	0,2	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,039215686	
0,584313725	0,588235294	0,043137255	0	0	0	0	0	0,039215686	0,152941176	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0,047058824	0,184313725	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,043137255	0	0,133333333	0,035294118	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0,368627451	0,094117647	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,062745098	0,247058824		
0	0	0	0	0	0	0,156862745	0,043137255	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,11372549	0,031372549	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,090196078	0,023529412	0	0	0	0	0	0
0,047058824	0,011764706	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,011764706		
0,047058824	0	0,011764706	0,043137255	0	0	0	0	0	0	0	0,003921569	0,023529412	0	0	0	0
0	0	0,031372549	0,007843137	0	0	0										


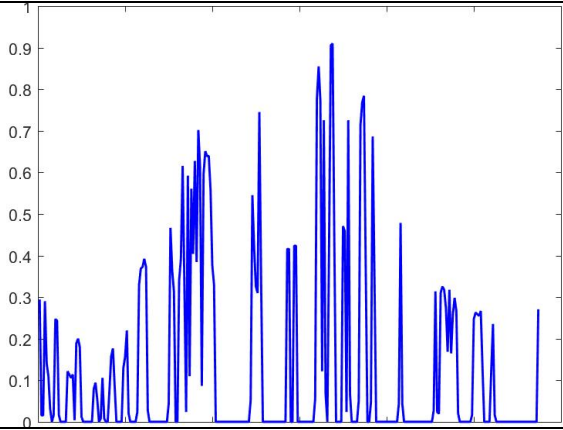
Продовження табл. Г.1

Назва хімічного елементу / Компонента вихідного вектору Y	Інтенсивність спектрального розподілу	Графік інтенсивностей спектрального розподілу								
Марганець (Mn) – y ₁₉										
Нормалізовані значення інтенсивностей спектрального розподілу / Вхідний вектор навчальної множини										
0	0,152941176	0,317647059	0,294117647	0,290196078	0,282352941	0,278431373	0,274509804	0,250980392	0,039215686	0,219607843
	0,007843137	0,121568627	0,258823529	0,223529412	0,011764706	0,019607843	0,117647059	0,109803922	0,105882353	0,078431373
	0,007843137	0,180392157	0,196078431	0,188235294	0,160784314	0,105882353	0,094117647	0	0,015686275	0,08627451
	0,062745098	0	0	0,015686275	0,054901961	0	0	0,070588235	0,08627451	0,141176471
	0,180392157	0,196078431	0,184313725	0,02745098	0,223529412	0,121568627	0	0	0	0
	0,192156863	0,188235294	0,02745098	0,164705882	0	0	0,047058824	0,188235294	0	0,047058824
	0,168627451	0,239215686	0,470588235	0,298039216	0,560784314	0,478431373	0,345098039	0,301960784	0	0
	0,31372549	0,247058824	0,070588235	0	0	0	0	0	0,074509804	0,28627451
	0	0,074509804	0,278431373	0	0	0	0	0,305882353	0,588235294	0,019607843
	0,250980392	0	0	0	0	0	0	0	0,356862745	0,356862745
	0	0	0,047058824	0,678431373	0,329411765	0,235294118	0,466666667	0,352941176	0,243137255	0,439215686
	0,780392157	0,360784314	0	0,062745098	0,541176471	0,423529412	0,725490196	0,039215686	0,066666667	0,415686275
	0,294117647	0,058823529	0,305882353	0,305882353	0,137254902	0,17254902	0	0	0	0
	0,454901961	0,454901961	0	0	0	0,047058824	0,17254902	0	0	0,047058824
	0,176470588	0,047058824	0	0	0	0	0	0	0	0,411764706
	0	0	0	0,352941176	0,670588235	0,047058824	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0,031372549	0,470588235	0,462745098	0,031372549	0
	0	0	0	0	0	0,019607843	0,074509804	0	0	0,035294118
	0,031372549	0,125490196	0	0	0	0	0	0	0	0,133333333
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0</									


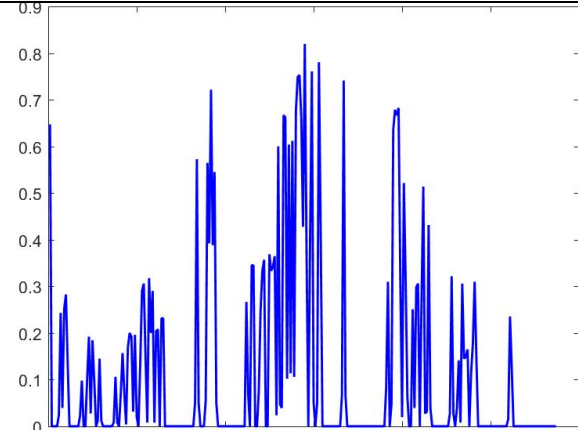
Продовження табл. Г.1

Назва хімічного елементу / Компонента вихідного вектору Y	Інтенсивність спектрального розподілу	Графік інтенсивностей спектрального розподілу																		
Нікель (Ni) – y ₂₀																				
Нормалізовані значення інтенсивностей спектрального розподілу / Вхідний вектор навчальної множини																				
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,007843137	0,098039216			
0,007843137	0	0	0	0,019607843	0,101960784	0,078431373	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0,129411765	0,231372549	0,192156863	0	0	0	0	0	0	0,196078431	0,047058824	0,031372549								
0,419607843	0,039215686	0	0	0,062745098	0,235294118	0	0	0,066666667	0,254901961	0	0,270588235									
0,047058824	0,274509804	0,050980392	0,282352941	0,074509804	0	0,278431373	0,376470588	0,047058824	0,28627451											
0,078431373	0	0	0,329411765	0,71372549	0,294117647	0,317647059	0,341176471	0,035294118	0,341176471	0,243137255										
0	0	0,250980392	0,133333333	0,22745098	0,235294118	0,047058824	0,254901961	0,066666667	0	0,247058824										
0,301960784	0,054901961	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0,043137255	0,168627451	0	0	0,058823529	0,650980392	0,058823529	0	0						
0	0	0	0	0	0,02745098	0,215686275	0,28627451	0	0,207843137	0,054901961	0	0	0,031372549							
0,117647059	0	0,050980392	0,164705882	0,352941176	0,094117647	0	0	0,376470588	0,098039216	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0,239215686	0,062745098	0	0,058823529	0,231372549	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,17254902	0,047058824	0	0	0	0	0
0	0,039215686	0,145098039	0,141176471	0,039215686	0	0	0	0	0	0,180392157	0,047058824	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,031372549	0,121568627	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,109803922	0,02745098	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,11372549	0,08627451	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0,054901961	0,015686275	0	0	0	0	0	0	0	0,207843137							

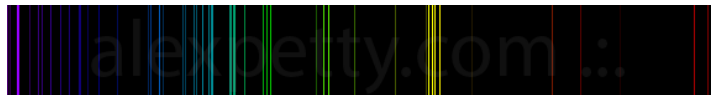
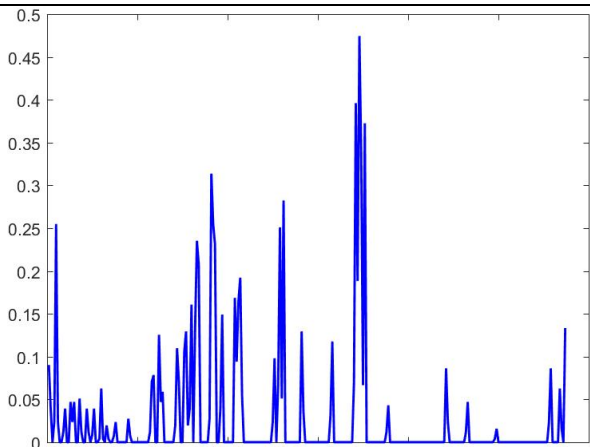
Продовження табл. Г.1

Назва хімічного елементу / Компонента вихідного вектору Y	Інтенсивність спектрального розподілу	Графік інтенсивностей спектрального розподілу								
Азот (N) – y ₂₁										
Нормалізовані значення інтенсивностей спектрального розподілу / Вхідний вектор навчальної множини										
0,294117647	0,015686275	0,015686275	0,290196078	0,141176471	0,109803922	0,031372549	0	0,015686275	0,247058824	0,243137255
0,015686275	0	0	0	0,121568627	0,11372549	0,105882353	0,11372549	0,003921569	0,188235294	0,2
0,180392157	0,011764706	0	0	0	0	0,078431373	0,094117647	0,054901961	0	0,007843137
0,105882353	0,007843137	0	0	0,074509804	0,156862745	0,176470588	0,08627451	0	0	0,129411765
0,156862745	0,219607843	0,019607843	0	0	0	0,023529412	0,329411765	0,368627451	0,37254902	0,392156863
0,37254902	0,02745098	0	0	0	0	0	0	0	0,043137255	0,466666667
0,364705882	0,31372549	0	0	0,341176471	0,392156863	0,615686275	0,333333333	0,023529412	0,592156863	0,109803922
0,560784314	0,403921569	0,62745098	0,384313725	0,701960784	0,611764706	0,08627451	0,596078431	0,650980392	0,639215686	
0,639215686	0,556862745	0,376470588	0,329411765	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0,050980392	0,545098039	0,419607843	0,325490196	0,309803922	0,745098039
0,341176471	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,415686275
0	0	0,423529412	0,423529412	0	0	0	0	0	0	0,054901961
0,854901961	0,77254902	0,121568627	0,725490196	0,066666667	0	0,431372549	0,905882353	0,909803922	0,435294118	0
0	0	0	0,470588235	0,458823529	0,023529412	0,725490196	0,066666667	0	0	0,050980392
0,71372549	0,768627451	0,784313725	0,37254902	0	0	0,047058824	0,68627451	0,356862745	0	0
0	0	0	0	0	0	0,043137255	0,478431373	0,043137255	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,02745098	0,31372549	0,023529412
0,309803922	0,325490196	0,317647059	0,274509804	0,168627451	0,317647059	0,164705882	0,258823529	0,298039216	0,266666667	
0,019607843	0	0	0	0	0	0,015686275	0,247058824	0,262745098	0,258823529	0,254901961
0,266666667	0,129411765	0	0	0	0	0,121568627	0,235294118	0,015686275	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,270588235


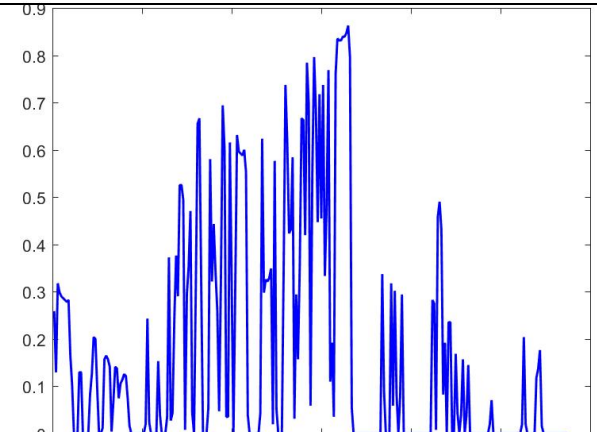
Продовження табл. Г.1

Назва хімічного елементу / Компонента вихідного вектору Y	Інтенсивність спектрального розподілу	Графік інтенсивностей спектрального розподілу											
Фосфор (P) – y ₂₂													
Нормалізовані значення інтенсивностей спектрального розподілу / Вхідний вектор навчальної множини													
0,647058824	0	0	0	0	0,023529412	0,243137255	0,039215686	0,250980392	0,282352941	0,133333333	0	0	0
0	0	0	0,023529412	0,098039216	0	0	0,101960784	0,192156863	0,02745098	0,184313725	0,098039216	0	0
0,011764706	0,145098039	0,011764706	0	0	0	0	0	0	0,007843137	0,105882353	0,007843137	0	0,070588235
0,156862745	0,070588235	0,003921569	0,168627451	0,2	0,192156863	0,031372549	0,196078431	0,019607843	0	0,133333333	0	0	0
0,290196078	0,305882353	0,145098039	0,007843137	0,317647059	0,2	0,290196078	0,007843137	0,203921569	0,207843137	0	0	0	0
0,231372549	0,231372549	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,050980392	0,57254902	0,050980392	0	0	0	0,054901961	0,564705882	0,392156863	0,721568627	0,388235294	0,545098039	0	0
0,050980392	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,266666667	0	0
0,070588235	0	0,345098039	0,345098039	0	0	0,074509804	0,247058824	0,333333333	0,356862745	0	0	0,368627451	0
0,333333333	0,341176471	0,364705882	0,023529412	0,6	0,047058824	0,039215686	0,666666667	0,662745098	0,101960784	0,603921569	0	0	0
0,11372549	0,611764706	0,105882353	0,678431373	0,749019608	0,752941176	0,662745098	0,42745098	0,819607843	0,380392157	0	0	0	0
0,396078431	0,760784314	0,050980392	0	0,050980392	0,780392157	0,407843137	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0,066666667	0,741176471	0,066666667	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0,082352941	0,309803922	0	0,047058824	0,635294118	0,678431373	0
0,666666667	0,682352941	0,317647059	0,019607843	0,521568627	0,317647059	0,062745098	0	0	0,250980392	0,039215686	0	0	0
0,298039216	0,305882353	0	0,270588235	0,51372549	0,02745098	0,031372549	0,431372549	0,039215686	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0,02745098	0,321568627	0,02745098	0	0,039215686	0,141176471	0,007843137	0,305882353	0	0
0,145098039	0,149019608	0,164705882	0	0,11372549	0,176470588	0,309803922	0,145098039	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,015686275	0,235294118	0,121568627	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0


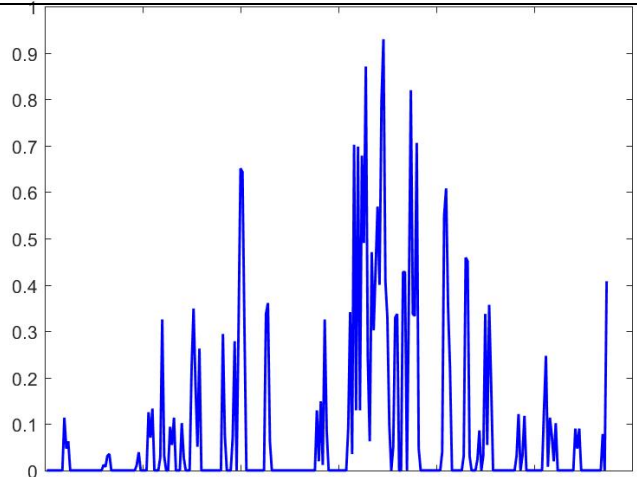
Продовження табл. Г.1

Назва хімічного елементу / Компонента вихідного вектору Y	Інтенсивність спектрального розподілу	Графік інтенсивностей спектрального розподілу
Калій (K) – y ₂₃		
Нормалізовані значення інтенсивностей спектрального розподілу / Вхідний вектор навчальної множини		
0,090196078 0,039215686 0 0,023529412 0,254901961 0,023529412 0 0 0,011764706 0,039215686 0 0 0,047058824		
0,023529412 0,047058824 0 0 0,050980392 0,011764706 0 0 0,039215686 0,011764706 0 0,007843137		
0,039215686 0 0 0,003921569 0,062745098 0,003921569 0 0,019607843 0,003921569 0 0 0,007843137		
0,023529412 0 0 0 0 0,02745098 0,007843137 0 0 0 0 0 0 0		
0 0 0,011764706 0,070588235 0,078431373 0 0 0,125490196 0,047058824 0,058823529 0 0 0 0		
0 0 0,019607843 0,109803922 0,070588235 0 0 0,105882353 0,129411765 0,019607843 0,039215686 0,160784314		
0 0,133333333 0,235294118 0,207843137 0 0 0 0 0,02745098 0,31372549 0,254901961 0,231372549		
0 0 0,039215686 0,149019608 0 0 0 0 0 0,168627451 0,094117647 0,164705882 0,192156863		
0,054901961 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0,023529412		
0,098039216 0 0,066666667 0,250980392 0,050980392 0,282352941 0 0 0 0 0 0 0 0		
0,129411765 0,035294118 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0,031372549		
0,117647059 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0,070588235 0,396078431 0,188235294		
0,474509804 0,337254902 0,066666667 0,37254902 0 0 0 0 0 0 0 0 0		
0,011764706 0,043137255 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0		
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0,08627451 0,023529412 0		
0 0 0 0 0 0 0,011764706 0,047058824 0 0 0 0 0 0 0		
0 0 0 0 0 0 0,003921569 0,015686275 0 0 0 0 0 0 0		
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0,023529412		
0,08627451 0 0 0 0 0,062745098 0,015686275 0 0,133333333		


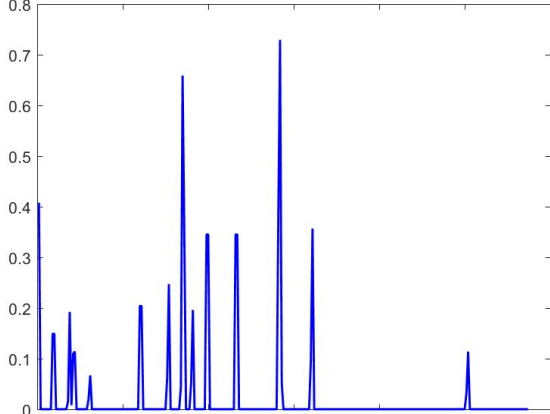
Продовження табл. Г.1

Назва хімічного елементу / Компонента вихідного вектору Y	Інтенсивність спектрального розподілу	Графік інтенсивностей спектрального розподілу										
Скандій (Sc) – y ₂₄												
Нормалізовані значення інтенсивностей спектрального розподілу / Вхідний вектор навчальної множини												
0,258823529	0,129411765	0,317647059	0,298039216	0,290196078	0,28627451	0,282352941	0,278431373	0,282352941	0,164705882			
0,101960784	0	0	0,129411765	0,129411765	0	0	0	0,082352941	0,125490196	0,203921569	0,2	
0,094117647	0	0	0,011764706	0,156862745	0,164705882	0,156862745	0,141176471	0,003921569	0,066666667	0,141176471		
0,137254902	0,074509804	0,105882353	0,11372549	0,125490196	0,121568627	0,074509804	0,015686275	0	0	0	0	
0	0	0,019607843	0,243137255	0,023529412	0	0	0	0,152941176	0,039215686	0	0	
0,035294118	0,37254902	0,02745098	0,043137255	0,239215686	0,376470588	0,290196078	0,525490196	0,525490196	0,494117647			
0,007843137	0,294117647	0,352941176	0,470588235	0,043137255	0	0,309803922	0,654901961	0,666666667	0,321568627	0	0	
0	0,054901961	0,580392157	0,321568627	0,443137255	0,341176471	0,258823529	0,047058824	0,321568627	0,694117647	0,603921569		
0,035294118	0,035294118	0,615686275	0,321568627	0	0,305882353	0,631372549	0,596078431	0,592156863	0,588235294	0,6		
0,552941176	0,039215686	0	0	0	0	0,043137255	0,623529412	0,298039216	0,325490196	0,321568627		
0,329411765	0,349019608	0,019607843	0,576470588	0,050980392	0	0	0	0,345098039	0,737254902	0,619607843	0,423529412	
0,431372549	0,584313725	0,031372549	0,294117647	0,156862745	0,356862745	0,666666667	0,662745098	0,419607843	0,784313725			
0,698039216	0,058823529	0,549019608	0,796078431	0,682352941	0,447058824	0,717647059	0,454901961	0,737254902	0,333333333			
0,482352941	0,768627451	0,109803922	0,192156863	0,035294118	0,760784314	0,835294118	0,831372549	0,831372549	0,839215686			
0,839215686	0,847058824	0,862745098	0,796078431	0,054901961	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0,337254902	0,090196078	0	0	0	0,317647059	0,058823529	0,301960784	0,082352941	0
0,078431373	0,294117647	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0,282352941	0,274509804	0,007843137	0,458823529	0,490196078	0,431372549	0,082352941	0,192156863	0	0,235294118	0,235294118		
0	0	0,168627451	0,043137255	0	0,039215686	0,156862745	0	0,039215686	0,145098039	0	0	0
0	0	0	0	0,019607843	0,070588235	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0,019607843	0,203921569	0,019607843	0	0	0	0,117647059	0,137254902	
0,176470588	0,015686275	0	0	0	0	0	0	0	0	0		


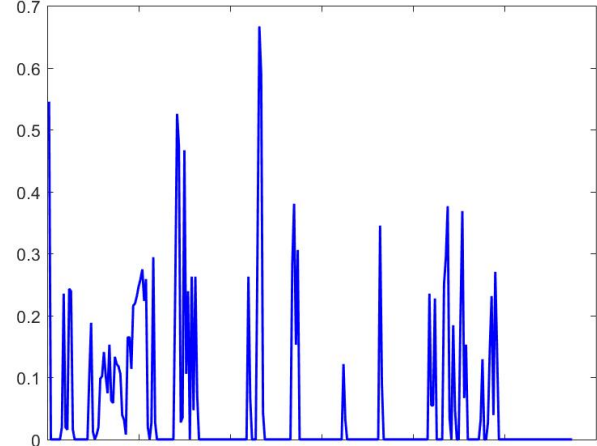
Продовження табл. Г.1

Назва хімічного елементу / Компонента вихідного вектору Y	Інтенсивність спектрального розподілу	Графік інтенсивностей спектрального розподілу														
Кремній (Si) – y ₂₅																
Нормалізовані значення інтенсивностей спектрального розподілу / Вхідний вектор навчальної множини																
0	0	0	0	0	0	0	0	0,11372549	0,047058824	0,062745098	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,011764706	0,007843137	0,031372549	0,035294118	0		
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,011764706	0,039215686	0	0	0	0	0
	0,125490196	0,070588235	0,133333333	0	0	0	0	0,02745098	0,325490196	0,031372549	0	0	0,094117647			
	0,054901961	0,11372549	0	0	0	0,101960784	0,02745098	0	0	0	0,219607843	0,349019608	0,184313725			
	0,050980392	0,262745098	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,294117647	0,074509804	0		
	0	0	0,070588235	0,278431373	0	0,31372549	0,650980392	0,643137255	0,305882353	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0,337254902	0,360784314	0,062745098	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,129411765	0,019607843	0,149019608			
	0,011764706	0,325490196	0,08627451	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,090196078	0,341176471		
	0,035294118	0,701960784	0,129411765	0,698039216	0,129411765	0,678431373	0,490196078	0,870588235	0,243137255	0,062745098						
	0,470588235	0,301960784	0,435294118	0,568627451	0,4	0,796078431	0,929411765	0,407843137	0,329411765	0,098039216	0					
	0,050980392	0,329411765	0,337254902	0	0	0,42745098	0,42745098	0	0,376470588	0,819607843	0,337254902					
	0,333333333	0,705882353	0,047058824	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,039215686			
	0,549019608	0,607843137	0,352941176	0,219607843	0	0	0	0	0	0	0,031372549	0,458823529	0,450980392			
	0,031372549	0	0	0,023529412	0,08627451	0	0,031372549	0,337254902	0,054901961	0,356862745	0,188235294					
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,031372549	0,121568627	0	0,031372549			
	0,117647059	0	0	0	0	0	0	0	0,129411765	0,247058824	0,007843137	0,11372549				
	0,074509804	0,019607843	0,101960784	0	0	0	0	0	0	0	0	0,090196078	0,047058824			
	0,090196078	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,078431373	0	0,407843137			


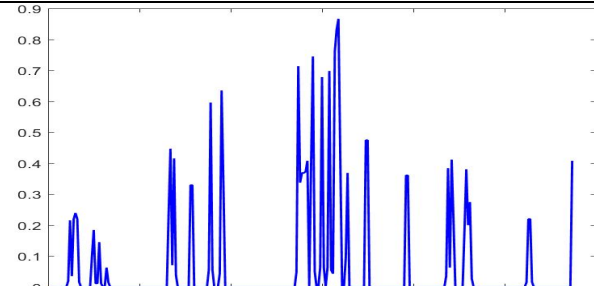
Продовження табл. Г.1

Назва хімічного елементу / Компонента вихідного вектору Y	Інтенсивність спектрального розподілу	Графік інтенсивностей спектрального розподілу
Срібло (Ag) – y ₂₆		
Нормалізовані значення інтенсивностей спектрального розподілу / Вхідний вектор навчальної множини		
0,407843137 0 0 0 0 0 0 0 0,149019608 0,149019608 0 0 0 0 0 0 0 0		
0,015686275 0,192156863 0,007843137 0,109803922 0,11372549 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0,019607843		
0,066666667 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0		
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0,203921569 0,203921569 0 0 0 0 0 0		
0 0 0 0 0 0 0 0 0,062745098 0,247058824 0 0 0 0 0 0 0,043137255		
0,658823529 0,349019608 0 0 0 0,050980392 0,196078431 0 0 0 0 0 0 0 0 0,345098039		
0,345098039 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0,345098039		
0,345098039 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0		
0 0 0 0 0 0,380392157 0,729411765 0,050980392 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0		
0 0 0 0 0 0 0 0,094117647 0,356862745 0 0 0 0 0 0 0 0 0		
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0		
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0		
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0		
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0		
0,031372549 0,11372549 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0		
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0		

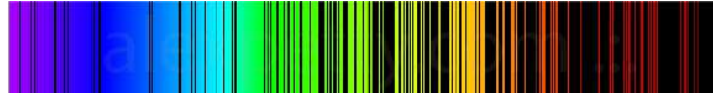
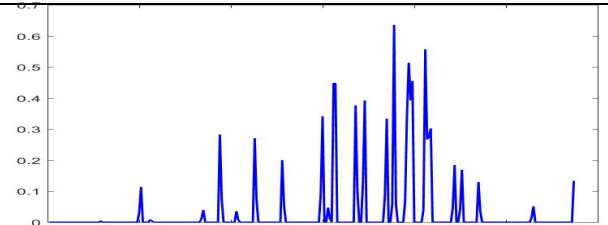
Продовження табл. Г.1

Назва хімічного елементу / Компонента вихідного вектору Y	Інтенсивність спектрального розподілу	Графік інтенсивностей спектрального розподілу
Натрій (Na) – y ₂₇		
Нормалізовані значення інтенсивностей спектрального розподілу / Вхідний вектор навчальної множини		
0,545098039 0 0 0 0 0 0 0,019607843 0,235294118 0,019607843 0,015686275 0,243137255 0,239215686		
0,015686275 0 0 0 0 0 0 0 0 0,101960784 0,188235294 0,011764706 0 0,007843137		
0,019607843 0,098039216 0,101960784 0,141176471 0,101960784 0,074509804 0,152941176 0,062745098 0,058823529 0,133333333		
0,121568627 0,117647059 0,105882353 0,039215686 0,031372549 0,007843137 0,164705882 0,164705882 0,11372549 0,215686275		
0,219607843 0,231372549 0,247058824 0,258823529 0,274509804 0,223529412 0,258823529 0,019607843 0 0,02745098		
0,294117647 0,02745098 0 0 0 0 0 0 0 0 0,243137255 0,525490196 0,474509804		
0,02745098 0,035294118 0,466666667 0,105882353 0,239215686 0 0,262745098 0,047058824 0,262745098 0,070588235 0		
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0		
0 0 0 0 0 0 0,262745098 0,066666667 0 0 0 0 0,31372549 0,666666667 0,588235294		
0,043137255 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0,282352941		
0,380392157 0,152941176 0,305882353 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0		
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0,121568627 0,031372549 0 0 0 0 0		
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0,345098039 0,090196078 0 0 0 0		
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0		
0 0,235294118 0,054901961 0,054901961 0,22745098 0 0 0 0 0,250980392 0,294117647 0,376470588		
0,035294118 0 0,184313725 0,047058824 0 0 0,2 0,368627451 0,066666667 0,152941176 0 0 0 0		
0 0 0 0,031372549 0,129411765 0 0 0,02745098 0,145098039 0,231372549 0,039215686 0,270588235		
0,141176471 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0		
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0		

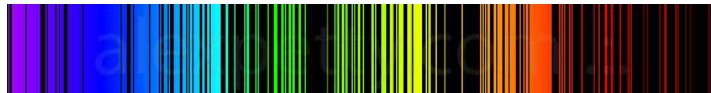
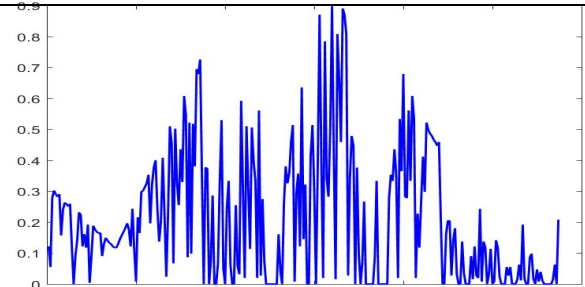
Продовження табл. Г.1

Назва хімічного елементу / Компонента вихідного вектору Y	Інтенсивність спектрального розподілу	Графік інтенсивностей спектрального розподілу																		
ОЛОВО (Sn) – y ₂₉																				
Нормалізовані значення інтенсивностей спектрального розподілу / Вхідний вектор навчальної множини																				
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0,003921569	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,031372549	0,11372549	0	0	0	0	0,007843137				
	0,003921569	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0,011764706	0,039215686	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,282352941	0,074509804	0	0	0	0	0	0	0	0	0,035294118	0,007843137	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0,270588235	0,070588235	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,2	0,050980392	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0,090196078	0,341176471	0	0	0	0,047058824	0,011764706	0	0	0,447058824	0,447058824	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0,376470588	0,098039216	0	0	0,125490196	0,392156863	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0,08627451	0,333333333	0	0	0,058823529	0,635294118	0,058823529	0					
	0	0	0	0,066666667	0,341176471	0,51372549	0,392156863	0,454901961	0	0	0	0	0	0	0	0,039215686				
	0,556862745	0,266666667	0,274509804	0,301960784	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,047058824	0,184313725	0	0	0,043137255	0,168627451	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,129411765			
	0,035294118	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0,015686275	0,050980392	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,133333333							


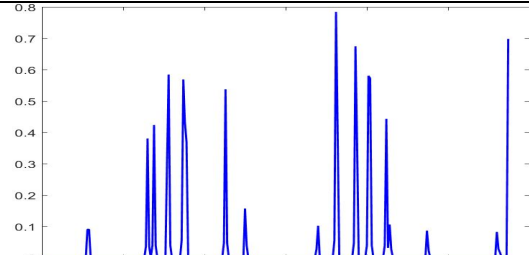
Продовження табл. Г.1

Назва хімічного елементу / Компонента вихідного вектору Y	Інтенсивність спектрального розподілу					Графік інтенсивностей спектрального розподілу				
Титан (Ti) – y ₃₀										
Нормалізовані значення інтенсивностей спектрального розподілу / Вхідний вектор навчальної множини										
0,796078431	0,392156863	0,396078431	0,396078431	0,364705882	0,274509804	0,388235294	0,380392157	0,380392157	0,270588235	
0,31372549	0,254901961	0,329411765	0,345098039	0,345098039	0,341176471	0,337254902	0,333333333	0,31372549	0,156862745	
0,305882353	0,298039216	0,282352941	0,235294118	0,235294118	0,274509804	0,290196078	0,282352941	0,278431373	0,274509804	
0,270588235	0,266666667	0,266666667	0,258823529	0,223529412	0,203921569	0,243137255	0,149019608	0,22745098	0,239215686	
0,250980392	0,258823529	0,270588235	0,282352941	0,294117647	0,301960784	0,31372549	0,321568627	0,333333333	0,345098039	
0,356862745	0,364705882	0,376470588	0,388235294	0,396078431	0,411764706	0,42745098	0,309803922	0,270588235	0,419607843	
0,462745098	0,470588235	0,482352941	0,490196078	0,505882353	0,51372549	0,525490196	0,537254902	0,564705882	0,321568627	
0,329411765	0,596078431	0,584313725	0,615686275	0,407843137	0,509803922	0,419607843	0,654901961	0,654901961	0,6	
0,443137255	0,701960784	0,698039216	0,709803922	0,631372549	0,705882353	0,756862745	0,474509804	0,662745098	0,741176471	
0,662745098	0,419607843	0,231372549	0,662745098	0,709803922	0,698039216	0,694117647	0,68627451	0,682352941	0,674509804	
0,674509804	0,666666667	0,670588235	0,6	0,447058824	0,462745098	0,364705882	0,603921569	0,615686275	0,203921569	
0,62745098	0,607843137	0,462745098	0,396078431	0,388235294	0,643137255	0,447058824	0,733333333	0,384313725	0,388235294	
0,725490196	0,721568627	0,454901961	0,643137255	0,725490196	0,678431373	0,17254902	0,098039216	0,450980392	0,525490196	
0,345098039	0,376470588	0,180392157	0,364705882	0,521568627	0,737254902	0,168627451	0,168627451	0,725490196	0,807843137	
0,423529412	0,42745098	0,819607843	0,71372549	0,509803922	0,815686275	0,42745098	0,631372549	0,17254902	0,101960784	
0,423529412	0,278431373	0,384313725	0,11372549	0,133333333	0,125490196	0,180392157	0,82745098	0,462745098	0,482352941	
0,607843137	0,388235294	0,396078431	0,498039216	0,584313725	0,847058824	0,156862745	0,419607843	0,541176471	0,2	
0,211764706	0,462745098	0,105882353	0,105882353	0,439215686	0,51372549	0,101960784	0,125490196	0,188235294	0,717647059	
0,556862745	0,705882353	0,729411765	0,22745098	0,780392157	0,521568627	0,717647059	0,792156863	0,8	0,501960784	
0,619607843	0,490196078	0,796078431	0,435294118	0,105882353	0,133333333	0,125490196	0,176470588	0,619607843	0,152941176	
0,423529412	0,42745098	0,101960784	0,168627451	0,631372549	0,450980392	0,325490196	0,117647059	0,117647059	0,337254902	
0,184313725	0,129411765	0,129411765	0,152941176	0,192156863	0,290196078	0,388235294	0,529411765	0,156862745	0,168627451	
0,337254902	0,309803922	0,435294118	0,160784314	0,129411765	0,129411765	0,168627451	0,274509804	0,121568627	0,133333333	
0,129411765	0,156862745	0,223529412	0,125490196	0,133333333	0,133333333	0,133333333	0,133333333	0,125490196	0,243137255	
0,160784314	0,129411765	0,129411765	0,156862745	0,266666667	0,231372549	0,125490196	0,133333333	0,125490196	0,22745098	
0,231372549	0,266666667	0,219607843	0,149019608	0,223529412	0,117647059	0,254901961	0,250980392	0,117647059	0,211764706	
0,239215686	0,247058824	0,262745098	0,211764706	0,125490196	0,133333333	0,133333333	0,133333333	0,133333333	0,133333333	
0,133333333	0,125490196	0,211764706	0,168627451	0,282352941	0,207843137	0,145098039	0,145098039	0,180392157	0,188235294	
0,149019608	0,133333333	0,133333333	0,133333333	0,133333333	0,133333333	0,133333333	0,133333333	0,133333333	0,133333333	

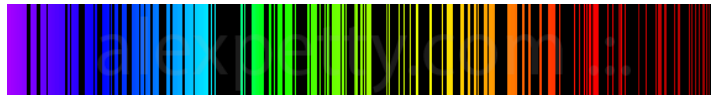
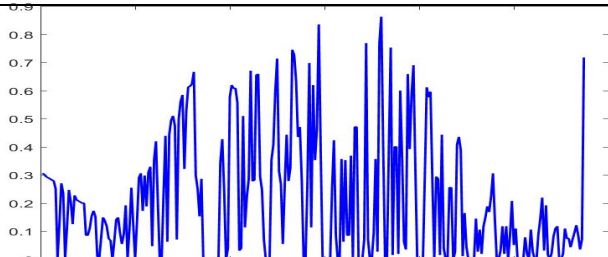
Продовження табл. Г.1

Назва хімічного елементу / Компонента вихідного вектору Y	Інтенсивність спектрального розподілу	Графік інтенсивностей спектрального розподілу									
Ванадій (V) – y ₃₁											
Нормалізовані значення інтенсивностей спектрального розподілу / Вхідний вектор навчальної множини											
0,121568627	0,054901961	0,278431373	0,301960784	0,290196078	0,282352941	0,290196078	0,156862745	0,239215686	0,262745098		
0,258823529	0,250980392	0,258823529	0,121568627	0	0,090196078	0,141176471	0,231372549	0,223529412	0,121568627		
0,160784314	0,117647059	0,192156863	0,003921569	0,090196078	0,188235294	0,176470588	0,168627451	0,164705882	0,164705882		
0,090196078	0,129411765	0,149019608	0,141176471	0,133333333	0,129411765	0,121568627	0,117647059	0,117647059	0,129411765		
0,145098039	0,156862745	0,168627451	0,180392157	0,196078431	0,176470588	0,121568627	0,243137255	0,11372549	0,007843137		
0,215686275	0,164705882	0,298039216	0,301960784	0,31372549	0,325490196	0,352941176	0,196078431	0,321568627	0,376470588		
0,4	0,243137255	0,137254902	0,203921569	0,407843137	0,223529412	0,023529412	0,231372549	0,509803922	0,454901961		
0,066666667	0,501960784	0,325490196	0,254901961	0,435294118	0,329411765	0,607843137	0,545098039	0,08627451	0,521568627		
0,098039216	0,517647059	0,380392157	0,694117647	0,678431373	0,725490196	0,349019608	0	0,376470588	0,37254902	0	
0,074509804	0,28627451	0	0	0,066666667	0,329411765	0,529411765	0,050980392	0	0,247058824	0,333333333	
0,062745098	0	0	0,254901961	0,058823529	0,031372549	0,592156863	0,301960784	0,019607843	0,509803922	0,309803922	
0,11372549	0,505882353	0,396078431	0,333333333	0,019607843	0,560784314	0,02745098	0,274509804	0,074509804	0	0	
0	0	0	0	0,160784314	0,043137255	0	0,258823529	0,380392157	0,325490196	0,356862745	0,458823529
0,51372549	0,007843137	0,294117647	0,356862745	0,121568627	0,635294118	0,145098039	0,321568627	0	0	0,415686275	
0,51372549	0,301960784	0	0,396078431	0,870588235	0,392156863	0,019607843	0,784313725	0,341176471	0,282352941		
0,505882353	0,898039216	0,407843137	0,015686275	0,807843137	0,662745098	0,458823529	0,890196078	0,870588235	0,807843137		
0,02745098	0,337254902	0,478431373	0,447058824	0	0,376470588	0,098039216	0	0,070588235	0,266666667	0	0
0	0	0	0,08627451	0,333333333	0	0	0	0	0,278431373	0,352941176	0,333333333
0,435294118	0,352941176	0,019607843	0,533333333	0,364705882	0,678431373	0,282352941	0,278431373	0,560784314	0,333333333		
0,607843137	0,533333333	0,019607843	0,22745098	0,117647059	0,266666667	0,411764706	0,298039216	0,521568627	0,498039216		
0,48627451	0,478431373	0,466666667	0,458823529	0,447058824	0,458823529	0,215686275	0	0	0,160784314	0,203921569	
0,203921569	0,02745098	0,141176471	0,180392157	0,031372549	0	0	0,137254902	0,035294118	0	0	0
0,090196078	0,015686275	0,121568627	0,02745098	0,019607843	0,243137255	0,007843137	0,137254902	0,117647059	0		
0,031372549	0,11372549	0	0,007843137	0,141176471	0,117647059	0,023529412	0	0	0	0,054901961	0,02745098
0,054901961	0	0	0,015686275	0,062745098	0,011764706	0,192156863	0,015686275	0	0	0,08627451	
0,098039216	0,015686275	0	0,047058824	0,007843137	0,039215686	0,011764706	0	0	0	0	0,015686275
0,062745098	0	0,207843137									

Продовження табл. Г.1

Назва хімічного елементу / Компонента вихідного вектору Y	Інтенсивність спектрального розподілу	Графік інтенсивностей спектрального розподілу																		
Цинк (Zn) – y ₃₂																				
Нормалізовані значення інтенсивностей спектрального розподілу / Вхідний вектор навчальної множини																				
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0,090196078	0,090196078	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0,035294118	0,380392157	0,035294118	0	0,039215686	0,423529412	0,039215686	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0,305882353	0,584313725	0,039215686	0	0	0	0	0	0	0	0	0,054901961	0,568627451	0	0	0	0
	0,431372549	0,368627451	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0,047058824	0,537254902	0,047058824	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0,156862745	0,039215686	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0,02745098	0,101960784	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0,054901961	0,784313725	0,407843137	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,047058824	0,674509804	0	0	0	0
	0,352941176	0	0	0	0	0	0,039215686	0,580392157	0,57254902	0,039215686	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0,039215686	0,443137255	0,031372549	0,105882353	0,02745098	0	0	0	0	0	0	0,08627451	0,023529412	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,082352941	0	0
	0,02745098	0,015686275	0	0	0	0	0	0,698039216	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Продовження табл. Г.1

Назва хімічного елементу / Компонента вихідного вектору Y	Інтенсивність спектрального розподілу						Графік інтенсивностей спектрального розподілу			
Цирконій (Zr) – y ₃₃										
Нормалізовані значення інтенсивностей спектрального розподілу / Вхідний вектор навчальної множини										
0,305882353	0,301960784	0,294117647	0,290196078	0,28627451	0,282352941	0,278431373	0,250980392	0,003921569	0,125490196	
0,270588235	0,235294118	0,003921569	0,11372549	0,247058824	0,203921569	0,125490196	0,22745098	0,211764706	0,207843137	
0,203921569	0,2	0,2	0,08627451	0,08627451	0,109803922	0,152941176	0,17254902	0,152941176	0,011764706	0
0,074509804	0,149019608	0,137254902	0,117647059	0,074509804	0,066666667	0	0,066666667	0,141176471	0,149019608	
0,094117647	0,054901961	0,090196078	0,192156863	0,003921569	0,109803922	0,254901961	0,121568627	0	0,137254902	
0,290196078	0,305882353	0,17254902	0,298039216	0,188235294	0,309803922	0,329411765	0,047058824	0,352941176	0,419607843	
0,2	0	0	0,231372549	0,439215686	0,062745098	0,443137255	0,494117647	0,509803922	0,474509804	0,070588235
0,498039216	0,560784314	0,584313725	0,321568627	0,525490196	0,611764706	0,615686275	0,623529412	0,666666667	0,298039216	
0,250980392	0,152941176	0,28627451	0	0	0	0	0	0,345098039	0,42745098	
0,247058824	0	0,039215686	0,576470588	0,619607843	0,607843137	0,607843137	0,556862745	0,031372549	0,039215686	
0,509803922	0,11372549	0,223529412	0,28627451	0,670588235	0,278431373	0,282352941	0,654901961	0,658823529	0,294117647	
0,247058824	0,070588235	0	0	0,352941176	0,407843137	0,596078431	0,71372549	0,31372549	0,266666667	
0,054901961	0,262745098	0,443137255	0,278431373	0,325490196	0,745098039	0,725490196	0,635294118	0,435294118	0,470588235	
0,282352941	0	0	0,274509804	0,698039216	0,11372549	0,619607843	0,352941176	0,462745098	0,835294118	0,388235294
0	0	0	0	0,250980392	0,423529412	0,08627451	0	0,356862745	0,062745098	0,352941176
0,08627451	0,08627451	0,368627451	0	0,470588235	0,470588235	0	0	0,070588235	0,768627451	0,070588235
0	0	0,094117647	0,356862745	0,02745098	0,768627451	0,862745098	0,403921569	0	0,396078431	0,752941176
0,015686275	0,4	0,4	0,019607843	0,6	0,360784314	0,062745098	0,035294118	0,658823529	0,392156863	0,584313725
0,690196078	0,321568627	0	0	0	0,294117647	0,611764706	0,576470588	0,596078431	0,278431373	0
0,294117647	0,28627451	0,015686275	0,443137255	0,039215686	0	0	0,254901961	0,254901961	0	0,02745098
0,407843137	0,435294118	0,388235294	0,011764706	0,164705882	0,043137255	0	0	0	0,145098039	0,02745098
0,105882353	0,019607843	0,117647059	0,149019608	0,188235294	0,168627451	0,223529412	0,305882353	0,141176471	0	0
0,031372549	0,117647059	0,019607843	0,117647059	0	0,08627451	0,207843137	0,050980392	0,109803922	0	0
0	0,078431373	0,019607843	0	0,105882353	0,02745098	0	0,090196078	0,145098039	0,219607843	0,031372549
0,192156863	0,015686275	0	0,023529412	0,082352941	0,109803922	0,117647059	0	0	0,019607843	0,109803922
0,074509804	0,074509804	0,043137255	0,070588235	0,094117647	0,121568627	0,08627451	0,035294118	0,070588235	0,717647059	

Додаток Д

Протоколи експериментальних досліджень гоніометра ГСІЛ

Дослідження систематичної і випадкової похибок ГСІЛ

Таблиця Д.1

ГСІЛ N 100 Дата 27.01.2004

Деталь: 24 Кількість вимірювань: 50

Відлік кутів проти годинникової стрілки

Число граней: 24 Ім'я еталону: 24

Номери граней	Плоскі кути			Еталон			Відхилення від еталону, сек.	СКВ, сек.	Y, сек.
	Град	Хв.	Сек.	Град	Хв.	Сек.			
1-2	14	59	59.49	14	59	59.41	0.08	0.11	-0.05
1-3	29	59	59.38	29	59	59.27	0.11	0.13	-0.07
1-4	45	0	0.78	45	0	0.73	0.05	0.14	-0.04
1-5	59	59	59.06	59	59	59.04	0.02	0.18	-0.03
1-6	74	59	58.76	74	59	58.78	-0.02	0.14	-0.03
1-7	89	59	59.51	89	59	59.58	-0.07	0.18	-0.01
1-8	104	59	58.28	104	59	58.31	-0.03	0.19	-0.04
1-9	119	59	59.69	119	59	59.67	0.02	0.16	-0.03
1-10	134	59	58.85	134	59	58.77	0.08	0.16	-0.02
1-11	149	59	59.13	149	59	59.03	0.10	0.15	-0.00
1-12	164	59	56.84	164	59	56.74	0.10	0.15	-0.02
1-13	179	59	59.39	179	59	59.35	0.04	0.14	-0.04
1-14	195	0	0.27	195	0	0.28	-0.01	0.14	-0.04
1-15	209	59	57.83	209	59	57.82	0.01	0.14	-0.04
1-16	225	0	2.97	225	0	2.91	0.06	0.15	-0.03
1-17	239	59	59.03	239	59	58.95	0.08	0.16	-0.05
1-18	254	59	57.13	254	59	56.99	0.14	0.15	-0.07
1-19	269	59	59.74	269	59	59.58	1.16	0.14	-0.07
1-20	284	59	58.93	284	59	58.81	0.12	0.14	-0.08
1-21	300	0	0.72	300	0	0.75	-0.03	0.12	-0.07
1-22	315	0	0.14	315	0	0.23	-0.09	0.12	-0.04
1-23	329	59	55.67	329	59	55.73	-0.09	0.12	-0.04
1-24	344	59	56.81	344	59	56.87	-0.06	0.11	-0.04

Макс. Y = 0.08 сек.

Макс. відхилення від еталону = 0.16 сек.

Загальне СКО: 0.14 сек.

Виключено приймань: 0

Допуск: 0.7

ГСІЛ N 100 Дата 27.02.2004

Деталь: 24

Кількість вимірювань: 50

Відлік кутів проти годинникової стрілки

Число граней: 24

Ім'я еталону: 24

Номери граней	Плоскі кути			Еталон			Відхилення від еталону, сек.	СКВ, сек.	Y, сек.
	Град	Хв.	Сек..	Град	Хв.	Сек.			
1-2	14	59	59.45	14	59	59.41	0.04	0.10	0.01
1-3	29	59	59.37	29	59	59.27	0.10	0.12	0.01
1-4	45	0	0.77	45	0	0.73	0.04	0.12	0.03
1-5	59	59	59.02	59	59	59.04	-0.02	0.12	0.01
1-6	74	59	58.70	74	59	58.78	-0.08	0.13	0.00
1-7	89	59	59.45	89	59	59.58	-0.13	0.14	0.02
1-8	104	59	58.23	104	59	58.31	-0.08	0.14	-0.03
1-9	119	59	59.65	119	59	59.67	-0.02	0.14	0.01
1-10	134	59	58.79	134	59	58.77	0.02	0.17	0.00
1-11	149	59	59.08	149	59	59.03	0.05	0.13	0.00
1-12	164	59	56.78	164	59	56.74	0.04	0.14	0.00
1-13	179	59	59.36	179	59	59.35	0.01	0.13	-0.00
1-14	195	0	0.24	195	0	0.28	-0.04	0.15	-0.02
1-15	209	59	57.77	209	59	57.82	-0.05	0.15	-0.02
1-16	225	0	2.93	225	0	2.91	0.02	0.15	-0.02
1-17	239	59	59.02	239	59	58.95	0.07	0.14	-0.04
1-18	254	59	57.14	254	59	56.99	0.15	0.15	-0.06
1-19	269	59	59.73	269	59	59.58	1.15	0.14	-0.03
1-20	284	59	58.85	284	59	58.81	0.14	0.14	-0.05
1-21	300	0	0.69	300	0	0.75	-0.06	0.13	-0.04
1-22	315	0	0.10	315	0	0.23	-0.13	0.14	-0.02
1-23	329	59	55.60	329	59	55.73	-0.13	0.12	-0.02
1-24	344	59	56.79	344	59	56.87	-0.08	0.11	-0.04

Макс. Y = 0.06 сек.

Макс. відхилення від еталону = 0.15 сек.

Загальне СКО: 0.13 сек.

Виключено приймань: 0

Допуск: 0.7

Таблиця Д.3

ГСІЛ N 100

Цикл вимірювань I

Номери граней	Плоскі кути			Еталон			Відхилення від еталону, сек.	СКВ, сек.	У, сек.
	Град	Хв.	Сек..	Град	Хв.	Сек.			
0-1	15	0	1,04	15	0	0,85	0,19	0,09	0,02
0-2	30	0	1,61	30	0	1,46	0,15	0,12	0,05
0-3	45	0	2,98	45	0	2,79	0,19	0,12	0,09
0-4	60	0	1,26	60	0	1,02	0,24	0,07	0,12
0-5	75	0	0,06	75	0	0	0,06	0,13	0,09
0-6	90	0	2,59	90	0	2,68	-0,09	0,12	0,03
0-7	105	0	2,71	105	0	2,82	-0,11	0,11	0,06
0-8	120	0	2,34	120	0	2,37	-0,03	0,14	0,08
0-9	134	59	59,92	134	59	59,87	0,05	0,18	0,1
0-10	150	0	0,83	150	0	0,8	0,03	0,16	0,11
0-11	165	0	2,37	165	0	2,39	-0,02	0,14	0,07
0-12	180	0	3,7	180	0	3,73	-0,03	0,12	0,05
0-13	195	0	0,57	195	0	0,62	-0,05	0,13	0,05
0-14	210	0	2,6	210	0	2,69	-0,09	0,17	0,04
0-15	225	0	1,83	255	0	1,95	-0,12	0,15	0,04
0-16	240	0	2,79	240	0	2,78	0,01	0,18	0
0-17	255	0	1,25	255	0	1,21	0,04	0,13	0,02
0-18	270	0	2,84	270	0	2,69	0,15	0,16	0,01
0-19	285	0	1,43	285	0	1,36	0,07	0,17	0
0-20	300	0	3,25	300	0	3,2	0,05	0,17	-0,04
0-21	315	0	1,03	315	0	1,04	-0,01	0,15	-0,02
0-22	330	0	1,94	330	0	2,06	-0,12	0,16	-0,03
0-23	344	59	59,73	344	59	59,79	-0,06	0,1	-0,05

 $\sigma=0,11;$ $\sigma_{ca}=0,14079;$ $Y_{max}=0,12;$ $\varphi_{max}=0,24$

Таблиця Д.4

ГСІЛ N 100

Цикл вимірювань II

Номери граней	Плоскі кути			Еталон			Відхилення від еталону, сек.	СКВ, сек.	У, сек.
	Град	Хв.	Сек..	Град	Хв.	Сек.			
0-1	15	0	1,03	15	0	0,85	0,18	0,07	-0,03
0-2	30	0	1,62	30	0	1,46	0,16	0,15	-0,03
0-3	45	0	3	45	0	2,79	0,21	0,15	-0,05
0-4	60	0	1,26	60	0	1,02	0,24	0,19	0
0-5	75	0	0,09	75	0	0	0,09	0,15	-0,03
0-6	90	0	2,57	90	0	2,68	-0,11	0,15	-0,08
0-7	105	0	2,78	105	0	2,82	-0,04	0,17	-0,02
0-8	120	0	2,35	120	0	2,37	-0,02	0,17	-0,02
0-9	135	59	59,91	134	59	59,87	0,04	0,15	0,03
0-10	150	0	0,86	150	0	0,8	0,06	0,16	0,01
0-11	165	0	2,42	165	0	2,39	0,03	0,12	0,04
0-12	180	0	3,76	180	0	3,73	0,03	0,16	0,06
0-13	195	0	0,62	195	0	0,62	0	0,13	0,01
0-14	210	0	2,68	210	0	2,69	-0,01	0,14	0,04
0-15	225	0	1,9	225	0	1,95	-0,05	0,12	0,03
0-16	240	0	2,86	240	0	2,78	0,08	0,14	0,02
0-17	255	0	1,34	255	0	1,21	0,13	0,14	-0,01
0-18	270	0	2,97	270	0	2,69	0,28	0,12	-0,04
0-19	285	0	1,53	285	0	1,36	0,17	0,13	0,02
0-20	300	0	3,35	300	0	3,2	0,15	0,11	-0,01
0-21	315	0	1,06	315	0	1,04	0,02	0,12	-0,06
0-22	330	0	2	330	0	2,06	-0,06	0,12	-0,08
0-23	345	59	59,82	344	59	59,79	0,03	0,11	-0,07

 $\sigma=0,123;$ $\sigma_{ca}=0,14009;$ $Y_{max}=0,08;$ $\varphi_{max}=0,28$

Таблиця Д.5

ГСІЛ N 100

Цикл вимірювань III

Номери граней	Плоскі кути			Еталон			Відхилення від еталону, сек.	СКВ, сек.	У, сек.
	Град	Хв.	Сек..	Град	Хв.	Сек.			
0-1	15	0	1,03	15	0	0,85	0,18	0,09	0,02
0-2	30	0	1,68	30	0	1,46	0,22	0,1	0,05
0-3	45	0	3,06	45	0	2,79	0,27	0,18	0,04
0-4	60	0	1,29	60	0	1,02	0,27	0,15	0,03
0-5	75	0	1,12	75	0	0	0,12	0,14	0,06
0-6	90	0	2,57	90	0	2,68	-0,12	0,18	-0,02
0-7	105	0	2,74	105	0	2,82	-0,08	0,15	0,04
0-8	120	0	2,39	120	0	2,37	-0,02	0,14	0,05
0-9	135	59	59,96	134	59	59,87	0,09	0,15	0,06
0-10	150	0	0,95	150	0	0,8	0,15	0,15	0,06
0-11	165	0	2,45	165	0	2,39	0,06	0,18	0,07
0-12	180	0	3,76	180	0	3,73	0,03	0,15	0,09
0-13	195	0	0,59	195	0	0,62	-0,03	0,17	0,07
0-14	210	0	2,7	210	0	2,69	0,01	0,17	0,06
0-15	225	0	1,94	225	0	1,95	-0,01	0,13	0,07
0-16	240	0	2,86	240	0	2,78	0,05	0,16	0,04
0-17	255	0	1,3	255	0	1,21	0,09	0,14	0,05
0-18	370	0	2,9	270	0	2,69	0,21	0,16	0,07
0-19	385	0	1,51	285	0	1,36	0,15	0,12	0,05
0-20	300	0	3,32	300	0	3,2	0,12	0,13	0,05
0-21	315	0	1,1	315	0	1,04	0,06	0,18	0,03
0-22	330	0	2,01	330	0	2,06	-0,05	0,14	0,01
0-23	345	59	59,76	344	59	59,79	-0,03	0,12	0

 $\sigma=0,13138;$ $\sigma_{ca}=0,14894;$ $Y_{max}=0,09;$ $\varphi_{max}=0,27$

Таблиця Д.6

ГСІЛ N 100

Цикл вимірювань IV

Номери граней	Плоскі кути			Еталон			Відхилення від еталону, сек.	СКВ, сек.	У, сек.
	Град	Хв.	Сек..	Град	Хв.	Сек.			
0-1	15	0	1	15	0	0,85	0,15	0,07	0
0-2	30	0	1,58	30	0	1,46	0,13	0,06	0,01
0-3	45	0	2,98	45	0	2,79	0,19	0,11	0,01
0-4	60	0	1,27	60	0	1,02	0,25	0,1	-0,01
0-5	75	0	0,06	75	0	0	0,06	0,12	-0,05
0-6	90	0	2,54	90	0	2,68	-0,14	0,09	-0,07
0-7	105	0	2,7	105	0	2,82	-0,12	0,1	0
0-8	120	0	2,31	120	0	2,37	-0,06	0,13	0
0-9	135	59	59,91	134	59	59,87	0,04	0,1	0,01
0-10	150	0	0,83	150	0	0,8	0,03	0,1	0,01
0-11	165	0	2,42	165	0	2,39	0,03	0,1	0
0-12	180	0	3,72	180	0	3,73	-0,01	0,09	0,02
0-13	195	0	0,58	195	0	0,62	-0,04	0,1	0,02
0-14	210	0	2,66	210	0	2,69	-0,03	0,08	0,03
0-15	225	0	1,89	225	0	1,95	-0,06	0,11	0,03
0-16	240	0	2,85	240	0	2,78	0,07	0,13	0,03
0-17	255	0	1,36	255	0	1,21	0,15	0,14	0,04
0-18	370	0	2,95	270	0	2,69	0,26	0,12	-0,01
0-19	385	0	1,52	285	0	1,36	0,16	0,11	0,03
0-20	300	0	3,29	300	0	3,2	0,09	0,12	0,08
0-21	315	0	1,07	315	0	1,04	0,03	0,11	0,01
0-22	330	0	1,95	330	0	2,06	-0,11	0,11	-0,01
0-23	345	59	59,77	344	59	59,79	-0,02	0,06	0

 $\sigma=0,11995$; $\sigma_{ca}=0,10463$; $Y_{max}=0,08$; $\varphi_{max}=0,26$

**Результати експериментальних досліджень
кільцевого лазера 3.970.029 гоніометра ГСІЛ**

Таблиця Д.7

Результати досліджень масштабного коефіцієнту кільцевого лазера 3.970.029
гоніометра ГСІЛ

№ циклу	1		2		3		4	
	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°
	2597377	2597543	2597376	2597540	2597375	2597539	2597373	2597535
	2597375	2597540	2597375	2597538	2597374	2597541	2597373	2597535
	2597376	2597538	2597375	2597541	2597374	2597537	2597368	2597532
	2597373	2597537	2597374	2597537	2597374	2597535	2597371	2597533
	2597376	2597536	2597375	2597537	2597373	2597536	2597368	2597530
Середнє	2597375,4	2597539	2597375	2597538,6	2597374	2597537,6	2597370,6	2597533
№ циклу	5		6		7		8	
	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°
	2597374	2597538	2597374	2597537	2597373	2597537	2597371	2597535
	2597373	2597538	2597370	2597536	2597370	2597534	2597368	2597534
	2597372	2597536	2597371	2597535	2597370	2597533	2597369	2597532
	2597371	2597534	2597370	2597534	2597371	2597534	2597368	2597531
	2597372	2597533	2597370	2597532	2597369	2597531	2597371	2597532
Середнє	2597372,4	2597536	2597371	2597534,8	2597370,6	2597533,8	2597369,4	2597533
№ циклу	9		10		11		12	
	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°
	2597368	2597533	2597366	2597532	2597366	2597530	2597366	2597539
	2597367	2597532	2597367	2597531	2597365	2597528	2597364	2597530
	2597368	2597532	2597366	2597530	2597365	2597528	2597365	2597526
	2597365	2597530	2597366	2597527	2597365	2597528	2597365	2597527
	2597365	2597528	2597364	2597528	2597364	2597527	2597363	2597526
Середнє	2597366,6	2597531	2597365,8	2597529,6	2597365	2597528,2	2597364,6	2597530
№ циклу	13		14		15		16	
	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°
	2597364	2597529	2597364	2597529	2597360	2597526	2597364	2597529
	2597364	2597530	2597360	2597528	2597361	2597525	2597364	2597530
	2597364	2597527	2597361	2597526	2597360	2597524	2597364	2597527
	2597362	2597525	2597362	2597524	2597359	2597523	2597362	2597525
	2597364	2597526	2597361	2597523	2597359	2597524	2597364	2597526
Середнє	2597363,6	2597527	2597361,6	2597526	2597359,8	2597524,4	2597363,6	2597527
№ циклу	17		18		19		20	
	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°
	2597350	2597514	2597349	2597514	2597348	2597513	2597348	2597512
	2597350	2597513	2597351	2597513	2597350	2597514	2597348	2597513
	2597350	2597513	2597349	2597511	2597349	2597512	2597346	2597509
	2597350	2597513	2597349	2597513	2597348	2597511	2597348	2597511
	2597349	2597510	2597351	2597511	2597350	2597510	2597347	2597509
Середнє	2597349,8	2597513	2597349,8	2597512,4	2597349	2597512	2597347,4	2597511
№ циклу	21		22		23		24	
	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°
	2597349	2597511	2597345	2597509	2597345	2597507	2597343	2597508
	2597345	2597510	2597343	2597508	2597344	2597508	2597343	2597506
	2597346	2597509	2597345	2597509	2597343	2597508	2597344	2597507
	2597347	2597509	2597344	2597507	2597343	2597506	2597343	2597506
	2597346	2597508	2597344	2597508	2597344	2597506	2597342	2597505

Продовження табл. Д.7

Середнє	2597346,6	2597509	2597344,2	2597508,2	2597343,8	2597507	2597343	2597506
№	25		26		27		28	
циклу	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°
	2597341	2597506	2597339	2597504	2597338	2597503	2597338	2597502
	2597342	2597507	2597340	2597504	2597339	2597502	2597338	2597502
	2597340	2597504	2597339	2597503	2597338	2597502	2597338	2597501
	2597340	2597505	2597340	2597502	2597339	2597501	2597336	2597500
	2597341	2597504	2597339	2597500	2597339	2597500	2597339	2597599
Середнє	2597340,8	2597505	2597339,4	2597502,6	2597338,6	2597501,6	2597337,8	2597501
№	29		30		31		32	
циклу	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°
	2597335	2597504	2597337	2597500	2597334	2597498	2597333	2597497
	2597339	2597504	2597335	2597500	2597335	2597500	2597332	2597497
	2597336	2597503	2597336	2597499	2597335	2597498	2597332	2597496
	2597336	2597502	2597336	2597498	2597333	2597497	2597332	2597494
	2597339	2597500	2597335	2597497	2597333	2597498	2597333	2597495
Середнє	2597337	2597503	2597335,8	2597498,8	2597334	2597498,2	2597332,4	2597496
№	33		34		35		36	
циклу	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°
	2597331	2597497	2597331	2597495	2597331	2597494	2597328	2597495
	2597332	2597495	2597331	2597495	2597330	2597494	2597331	2597492
	2597332	2597494	2597331	2597494	2597331	2597494	2597325	2597491
	2597332	2597495	2597331	2597494	2597329	2597492	2597328	2597493
	2597332	2597494	2597332	2597494	2597329	2597493	2597330	2597491
Середнє	2597331,8	2597495	2597331,2	2597494,4	2597330	2597493,4	2597338,4	2597492
№	37		38		39		40	
циклу	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°
	2597327	2597492	2597325	2597489	2597325	2597484	2597324	2597488
	2597327	2597490	2597326	2597490	2597325	2597488	2597325	2597488
	2597325	2597490	2597325	2597489	2597325	2597489	2597325	2597488
	2597329	2597491	2597325	2597489	2597326	2597486	2597325	2597487
	2597323	2597490	2597327	2597487	2597324	2597488	2597324	2597487
Середнє	2597326,2	2597491	2597325,6	2597488,8	2597325	2597488	2597324,6	2597488
№	41		42		43		44	
циклу	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°
	2597323	2597488	2597322	2597486	2597320	2597485	2597321	2597484
	2597324	2597487	2597321	2597487	2597323	2597486	2597316	2597484
	2597323	2597487	2597323	2597486	2597320	2597484	2597320	2597483
	2597323	2597486	2597322	2597486	2597322	2597484	2597321	2597483
	2597324	2597486	2597322	2597484	2597320	2597483	2597320	2597482
Середнє	2597323,4	2597487	2597322	2597485,8	2597321	2597484,4	2597319,6	2597483
№	45		46		—	—	—	—
циклу	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	$K_i \downarrow$, пер/°	$K_i \uparrow$, пер/°	—	—	—	—
	2597319	2597466	2597120	2597566	—	—	—	—
	2597317	2597467	2597119	2597567	—	—	—	—
	2597317	2597466	2597119	2597565	—	—	—	—
	2597322	2597467	2597120	2597564	—	—	—	—
	2597318	2597464	2597117	2597564	—	—	—	—
Середнє	2597318,6	2597466	2597119	2597565,2	—	—	—	—